

THESE

présentée

à l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON - I

POUR OBTENIR

le grade de DOCTEUR DE 3^e CYCLE

en SCIENCES ODONTOLOGIQUES

par

Marc KLEINBERG

* * * * *

Etudes expérimentales de l'usure des couples
émail ~ matériaux prothétiques.

— Importance de l'attrition canine —

SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 27 AVRIL 1976

JURY

Président : R. Bernard

R. Vincent

G. Penne

J. Brugirard

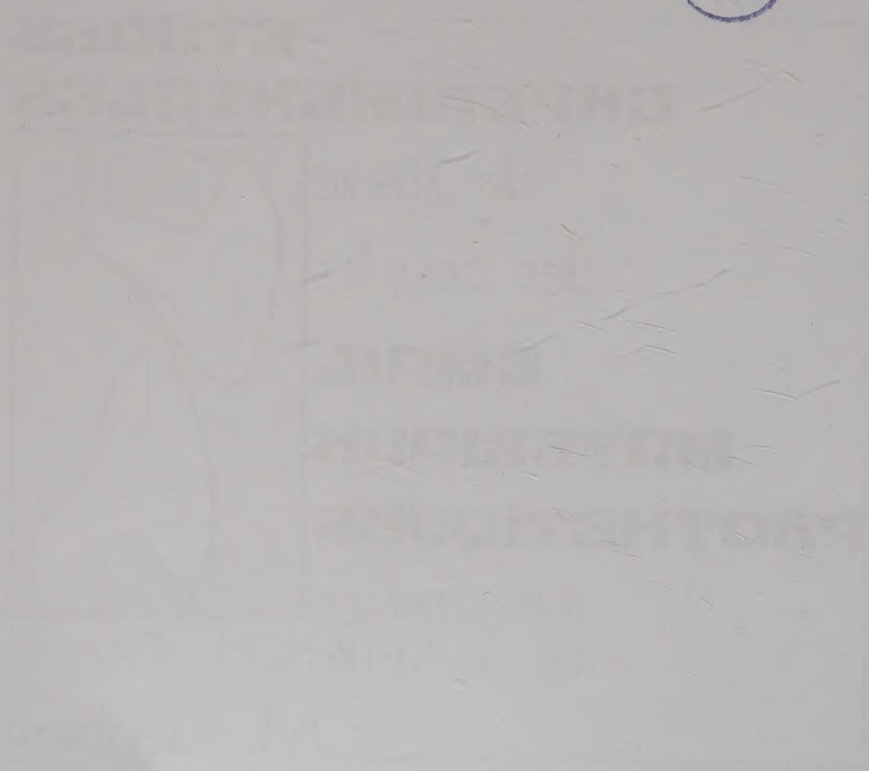
J.C. Marty

**ETUDES
EXPERIMENTALES**
de l'usure
des couples
**EMAIL
MATERIAUX
PROTHETIQUES**



IMPORTANCE
DE L'ATTRITION CANINE

M. Kleinberg



UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

Président :	M. le Professeur D. GERMAIN
1er Vice-Président :	M. le Professeur E. ELBAZ
2ème Vice-Président :	M.
3ème Vice-Président :	M.
Secrétaire Général :	M. J. RAMBAUD, Administrateur Civil

UNITE D'ENSEIGNEMENT et de RECHERCHE

Unités

Directeurs

U.E.R. Médicale Grange-Blanche	M. le Professeur B. SALLES
U.E.R. Médicale Alexis-Carrel	M. le Professeur C. GIROD
U.E.R. Médicale Lyon-Nord	M. le Professeur J.P. GARIN
U.E.R. Médicale Lyon-Sud-Ouest	M. le Professeur J.M. ROBERT
U.E.R. des Sciences Pharmaceutiques	M. le Professeur L. ODDOUX
U.E.R. des Sciences Odontologiques	M. le Professeur R. VINCENT
U.E.R. des Techniques de Réadaptation	M. A. MORGON, Maître de Conférences
U.E.R. de Biologie Humaine	M. le Professeur J.C. CZYBA
U.E.R. d'Education Physique et Sportive	M. A. MILLON, Professeur d'E.P.S.
U.E.R. de Mathématiques	M. le Professeur H. BUCHWALTER
U.E.R. de Physique	M. le Professeur R. UZAN
U.E.R. de Chimie et Biochimie	M. le Professeur J. HUET
U.E.R. des Sciences de la Nature	M. le Professeur J. BRUN
U.E.R. de Sciences Physiologiques	M. R. FONTANGES, Maître de Conférences
U.E.R. de Physique Nucléaire	M. le Professeur A. SARAZIN
U.E.R. de Mécanique	M. le Professeur J. MATHIEU
Observatoire	M. le Professeur J.H. BIGAY
Institut Universitaire de Technologie I	M. le Professeur B. POUYET
Institut Universitaire de Technologie II	M. J. GALLET, Directeur E.N.S.A.M.

U. E. R. des SCIENCES ODONTOLOGIQUES

Directeur : M. R. VINCENT - Professeur de catégorie exceptionnelle
Directeur-Adjoint : M. J. PARRET - Professeur de catégorie exceptionnelle
Directeur-Adjoint : M. H. CHAMBAZ - Professeur 2ème grade

PROTHESE

M. J. BRUGIRARD		Professeur de catégorie exceptionnelle
M. B. LALLICH	}	Professeurs 1er grade
M. C. MALQUARTI		
M. A. DUMONT	}	Professeurs 2ème grade
M. J. EXBRAYAT		
M. L. TOURTET		
M. D. BOIS		

ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

M. J. E. HESKIA	}	Professeurs 1er grade
M. H. DEPLAGNE		
M. F. BRUNNER	}	Professeurs 2ème grade
M. J. CHASSIGNOL		

PERODONTIE-PREVENTION

M. M. CAUDMONT	Professeur 2ème grade
----------------	-----------------------

PATHOLOGIE ET THERAPEUTIQUE

M. R. VINCENT	Professeur de catégorie exceptionnelle
M. L. MATHIEU	Professeur 1er grade
M. P. BERTOIN	Professeur 2ème grade

PARODONTOLOGIE

M. G. PERDRIX	Professeur 2ème grade
---------------	-----------------------

DENTISTERIE CONSERVATRICE

M. J. POULARD	}	Professeurs 1er grade
M. J. PEROL		
M. R. THOMAS	}	Professeurs 2ème grade
M. J. BLANC-BENON		
M. H. CHAMBAZ		
M. P. BONIN		
M. G. LABE		

BIOLOGIE ET MATIERES FONDAMENTALES

M. J. PARRET	Professeur de catégorie exceptionnelle	
M. J. DUMONT	Professeur 1er grade	
M. P. LIBOUREL	}	Professeurs 2ème grade
M. H. MAGLOIRE		
M. H. VIGNARD		

à notre présence de 1926,

Monsieur la Président, M. POISSON,

Président de l'Association des
et l'Association des Amis.

Monsieur la Président, j'ai l'honneur
de vous adresser, en votre qualité de
président de l'Association des Amis,
un message de bienvenue et de
sympathie.

A la mémoire de mon Père

A ma Mère

A ma Femme, dont le soutien m'a été précieux

A mes Enfants

A mes Beaux-Parents

A ma Famille

A mes Amis.

à notre président de thèse ,

Monsieur le Professeur R. BERNARD,

Professeur de Physique Industrielle
à l'Université Claude Bernard.

Nous sommes particulièrement sensible à l'honneur
qu'il nous fait, et nous le remercions vivement pour
la confiance qu'il nous a témoignée. Qu'il veuille
bien trouver ici l'expression de notre gratitude pour
l'intérêt bienveillant qu'il a porté à notre travail.

à nos juges ,

Monsieur le Professeur R. VINCENT,

Doyen de l'UER des Sciences Odontologiques
de l'Université Claude Bernard.

Qu'il veuille trouver ici l'assurance de notre gratitude pour l'urbanité et l'ouverture d'esprit qu'il a toujours témoignées à notre égard. Le retrouver dans notre jury, bien des années après "l'Ecole Dentaire est un plaisir et un honneur. Nous lui sommes profondément reconnaissant pour ce qu'il nous a apporté, ainsi qu' à la profession.

Monsieur le Professeur G. PENNE,

Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire
de l'Université Paris VII.

Il nous a fait le grand honneur et l'amitié malgré ses multiples occupations, de venir siéger au sein de ce jury, et témoigner de son intérêt pour notre travail. Nous tenons à le remercier très sincèrement de sa disponibilité et de son dévouement mis au service du progrès des sciences odontologiques.

Monsieur le Professeur J. BRUGIRARD,

Chef du Département de Prothèse
à l'UER des Sciences Odontologiques
à l'Université Claude Bernard.

Par ses encouragements, il nous a incité à persévérer dans la voie de cette recherche. Il est pour nous un exemple de générosité, de travail et de confraternité. Nous le remercions vivement des judicieux conseils qu'il a bien voulu nous prodiguer.

Monsieur J.C. MARTY,

Maître-Assistant à l'INSA,
Chef du Département de Technologie.

Il nous a largement ouvert les portes de son laboratoire où ont été effectuées les expérimentations. Il a consacré beaucoup de son temps pour combler nos lacunes. Sans lui, ce travail n'aurait pu se faire. Qu'il veuille trouver ici, le témoignage de notre profonde gratitude et de l'amitié qui s'est établie entre nous après ce long travail en commun.

INTRODUCTION



Les observations cliniques suivantes, ont été le départ de cette étude :

- l'usure régulière généralisée, physiologique des faces occlusales avec l'âge,
- la présence de surfaces d'attrition réparties irrégulièrement sur les faces occlusales
- la présence de surfaces d'usure sur les matériaux prothétiques en bouche.

Ces faits révèlent l'importance des usures par frottement et l'importance des propriétés mécaniques de l'émail et des matériaux de substitution prothétique.

D'autre part, l'évolution des connaissances technologiques, biologiques et physiologiques a permis de déterminer des critères de plus en plus précis pour la construction de prothèse conjointe, ainsi que pour le choix des matériaux.

En particulier, l'accent a été mis depuis une ou deux décades sur le rôle fonctionnel de chacun des éléments du système stomatognathique qui réagissent les uns sur les autres. Tout élément de substitution, que ce soit un amalgame, un inlay, une couronne, un bridge, participe à un système fonctionnel.

Avant le XIXème siècle, le critère de substitution d'un organe dentaire manquant, était surtout géométrique : on essayait de combler les espaces vides et d'inclure un système prothétique s'ordonnant plus ou moins avec les dents adjacentes et antagonistes (prothèse en or à bandeau égyptiennes, prothèses avec dents d'animaux au XVII et au XVIIIème siècle) .

Au cours du XIX et XXème siècle, on s'est préoccupé en outre, des propriétés mécaniques des matériaux :

- résistance
- qualités physico-mécaniques
- tolérance
- usinabilité etc ...

On a, peu ou prou, appliqué à la construction des bridges (ponts) les règles du génie civil (TYLMAN ⁽⁷⁰⁾).

Parallèlement à cette évolution, les connaissances acquises sur la physiologie du système stomato-gnathique, permettent d'envisager la réalisations de prothèses conjointes mieux intégrées dans ce système, afin d'assurer une fonction harmonieuse, une protection plus efficace des tissus de soutien, des muscles et de l'articulation temporo-mandibulaire, ainsi qu'une durée plus longue de l'ensemble mécanique et anatomo-physiologique.

Nous nous sommes intéressés au comportement d'un matériau de substitution, inclus dans cet "appareil à user" qu'est le système manducateur. En effet, cette machine complexe a pour rôle, entre autre, de réduire toutes sortes de matières, en particules plus fines, soit dans un but artisanal, soit dans un but alimentaire. Ce mécanisme a pour conséquence une usure de l'outil, en particulier celui de l'émail dentaire, ou du matériau de substitution.

Cette usure globale de l'émail comprend deux processus (MOORREES, DAHLBERG ⁽⁴⁶⁻²¹⁾);

- l'usure par abrasion
- l'usure par attrition.

L'usure par abrasion est due à la présence de particules à l'interface, en l'occurrence les matériaux ou aliments transmis à la cavité buccale. Ce processus dépend du type alimentaire, des moeurs et de la culture d'une population (JACOBSON ⁽³²⁾, BAER ⁽⁵⁾, BEGG ⁽⁷⁾, MOLNAR ⁽⁴⁵⁾. Il dépend aussi du mode de mastication (BEYRON ⁽⁸⁾, WEINBERG ⁽⁷¹⁾).

L'usure par attrition, résulte de la friction directe de l'émail sur l'émail, soit par les faces occlusales antagonistes, soit par les faces proximales.

Les variables à prendre en considération dans l'étude de l'attrition étant moins nombreuses que pour l'étude de l'abrasion, nous avons choisi d'envisager seulement l'attrition, c'est-à-dire :

L'usure par friction directe de l'émail sur l'émail
ou de l'émail sur des matériaux prothétiques

Les constructions prothétiques, unitaires ou plurales, les "réhabilitations" occlusales exigent des préparations de plus en plus sophistiquées, des techniques d'empreintes très élaborées, parfois des enregistrements panthographiques et un travail de laboratoire très minutieux. Il devient alors primordial de tenir compte du facteur usure, afin d'assurer la pérennité et la fiabilité des résultats prothétiques.

La reconstitution prothétique unitaire la plus fréquente se fait au niveau du segment postérieur de l'arcade sous la forme d'une coiffe métallique. Cependant, le choix d'un couple antagoniste postérieur n'est pas idéal pour l'étude du comportement à l'usure ; en effet, les dents contigües jouant un rôle de butée, limitent l'usure du couple considéré.

Par contre, le choix du couple canine / canine est favorable pour l'étude de l'usure sans interférence des autres dents. De par la longueur de sa racine, de par le volume et la morphologie de sa couronne, de par sa situation sur l'arcade, de par son rôle dans l'occlusion, et surtout si l'on retient son rôle de protection et guide de l'occlusion des gnathologistes, la canine offre un intérêt exceptionnel.

En outre, la canine est souvent utilisée comme support d'une restauration unitaire, comme pilier de bridge et comme élément d'une "réhabilitation" occlusale.

L'importance de cette dent dans l'économie du système manducateur nous a donc fait choisir le couple canine / canine pour l'étude de.

l'usure par frottement de l'émail / émail
et pour l'étude de l'usure par frottement de l'émail / matériaux prothétiques.

De nombreuses études ont été menées tant au point de vue de la physiologie et de la clinique, de la science des matériaux et de la technologie, pourtant les recherches se rapportant à l'usure en général et au comportement des matériaux à l'usure, sont relativement rares. Ainsi, nous aborderons le sujet d'après le plan suivant :

Chapitre I : Usure et bio-physiologie

Chapitre II : Usure et propriétés des matériaux

Chapitre III : Les études expérimentales de l'usure par friction

A - Les études expérimentales antérieures

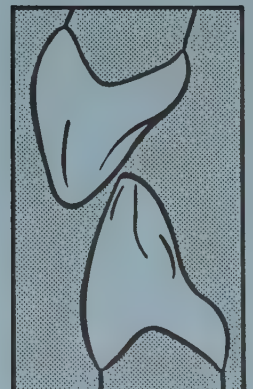
B - L'étude expérimentale personnelle

Conclusions Générales

Annexes

CHAPITRE I.

USURE ET BIOPHYSIOLOGIE



I - ESSAI DE CLASSIFICATION

Pendant longtemps il n'a pas été fait de différence entre l'abrasion et l'attrition, et les premiers auteurs de la fin du XIX^{ème} et de la moitié du XX^{ème} siècle ont envisagé l'usure globale résultant des 2 processus. Ils se sont intéressés à ce problème sous l'angle anthropologique et ethnologique.

L'un des premiers, BROCA ⁽¹²⁾ en 1897 a donné une classification de l'usure, en considérant la 1^{ère} molaire et a décrit 4 étapes :

- 1) usure de l'émail sans effacement des cuspides et sans exposition de la dentine
- 2) disparition partielle de l'émail et exposition partielle de la dentine
- 3) exposition complète de la dentine, avec une usure partielle de la couronne
- 4) usure étendue de la couronne jusqu'au collet de la dent.

Cette classification a été généralement acceptée; elle a l'inconvénient de ne s'appliquer qu'à une dent isolée. Certains auteurs ont améliorés cette classification, ainsi JACOBSON ⁽³²⁾ donne une valeur 1, 2, 3, 4 à chaque étape de l'usure et à chacune des dents de l'arcade et totalise ces valeurs pour obtenir l'indice d'usure de l'arcade.

MOLNAR ⁽⁴⁵⁾ tient compte, lui aussi du critère d'exposition de la dentine, et en plus du degré et du type d'usure de chaque groupe de dents, il enregistre en outre la direction et la forme de l'usure occlusale de chaque dent. Ces informations sont analysées par un computer.

II - POINT DE VUE DES ANTHROPOLOGUES ET DES ETHNOLOGUES

A travers leurs recherches, les anthropologues et les ethnologues ont tentés de répondre, avec plus ou moins de bonheur, à diverses questions : l'usure des arcades dentaires est-elle un processus physiologiques normal ? Ce processus a-t-il des conséquences sur la hauteur faciale, sur l'occlusion ? Peut-il être la cause de maladies paradontales et de résorption de l'os alvéolaire ?

BLACK ⁽⁹⁾ avait déjà noté que le montant total de l'usure proximale d'une arcade, correspondait à la largeur d'une prémolaire, au cours d'une vie d'un masticateur énergique.

BEGG, d'après une étude sur l'Homme de l'Age de Pierre, calcule que l'attrition interproximale réduit l'arcade mandibulaire de 10,5 mm et de 9,5 mm l'arcade maxillaire, (avant l'éruption de la 3ème molaire), et que cette réduction peut aller jusqu'à 14,7 mm. Les points de contact se transforment en surfaces de contact, le contact proximal étant maintenu du fait du processus de l'éruption verticale continue (d'après GOTTLIEB ⁽²⁴⁾) et de la migration mésiale des dents. BEGG ⁽⁷⁾ comme ses partisans déduisent que les cuspides non usées sont inefficaces au point de vue masticatoire, comparées aux surfaces aplanies par l'usure; et déduisent de même que "l'overbite" incisif et la rétention des cuspides réduisent les excursions mandibulaires; enfin, que l'absence d'usure chez les peuples civilisés, est à l'origine de l'encombrement dentaire et de mal-occlusions.

MURPHY ⁽⁴⁷⁾ d'après une étude biométrique sur des squelettes d'aborigènes australiens, constate une attrition modérées vers 30 ans et forte vers 50 ans. Sur ces vingt années, il a calculé une perte par usure de 8 mm sur l'incisive centrale d'une femme aborigène, soit environ 2/10 de mm par an pour chaque incisive antagoniste. Cette usure a pour conséquence une diminution de la hauteur faciale, chez l'aborigène, et une augmentation de l'espace interocclusal (qui est de 3,2 mm pour la femme, et de 2,2 mm pour l'homme).

BAER ⁽⁵⁾ et al. se sont intéressés aux conséquences de l'usure sur l'os alvéolaire : d'après l'examen de crânes de gorilles du Congo; ils constatent que l'usure dentaire et la perte osseuse sont en rapport avec l'âge, mais que l'usure dentaire n'est pas responsable de la perte osseuse. Il en est de même d'après l'examen de crânes d'Indiens de l'Illinois. D'après une étude épidémiologique sur des militaires en Birmanie, ils remarquent une usure rapide de la molaire en rapport avec l'âge, mais à l'intérieur de chaque groupe d'âge l'usure est très variable, et elle peut être sévère sur de jeunes individus. L'attrition molaire explique seulement 2% de l'étiologie de la maladie paradontale, et seulement 7% de la récession gingivale. Enfin, l'incidence du type de nourriture est mise en évidence sur des souris, nourriture à laquelle on a ajouté 10 à 15% de ponce. La présence de cet abrasif a augmenté l'usure dentaire, mais cette usure n'a pas eu d'incidence significative quant à la perte d'os alvéolaire.

La plupart des anthropologues et ethnologues sont donc d'accord pour constater sur l'Homme Préhistorique et les tribus primitives, une usure marquée des arcades dentaires, en fonction de l'âge. Cependant MOORREES ⁽⁴⁶⁾ insiste sur l'utilité limitée d'estimer l'âge d'après le degré d'attrition.

MOLNAR ⁽⁴⁵⁾ d'après une étude sur des squelettes d'Indiens d'Amérique du Nord, montre que les différents stades et types d'usure sont fonction de différences culturelles : technique de préparation des éléments et activités technologiques, de même que BONIN ⁽¹⁰⁾ a montré l'influence du genre de diète sur l'usure dentaire et la modification faciale.

Comme ACKERMAN ⁽¹⁾ l'a montré, cette usure dentaire est généralement du type horizontal allant vers le type hélicoïdal, et une inversion de la courbe de MONSON.

III - GNATHOLOGIE ET ROLE DE LA CANINE

Le problème s'est posé de savoir si l'usure est un processus physiologique. Pour ALEXANDER ⁽²⁾, à la suite de SICHER ⁽⁶⁴⁾, l'usure des dents chez la plupart des mammifères, est un processus physiologique constant. En fait, les dents de beaucoup d'espèces ne sont pas très adaptées à la mastication, avant que l'attrition n'ait aplani les cuspides.

Cette opinion n'est pas acceptée par les gnathologistes, en particulier A. d'AMICO ⁽³⁾, qui proclame que "l'attrition des cuspides vestibulaires des dents de l'homme réduit l'efficacité masticatoire de leur action de cisaillement. L'attrition ne renforce pas la fonction masticatoire des dents. La prévention de l'attrition est une des fonctions de la canine, dans l'ordre des Carnivores et des Primates. Le concept de "l'éruption continue" des dents, n'est pas non plus, accepté par d'AMICO ⁽³⁾ et son école : cette théorie n'est pas vérifiée ni au point de vue anthropologique, ni au point de vue vétérinaire.

D'AMICO ⁽³⁾ et l'école de gnathologie accorde à la canine un rôle prépondérant dans l'occlusion, rôle définit ainsi :

- 1) elles fonctionnent comme des organes tactiles
- 2) la proprioception des neurones tactiles aux cellules réceptrices afférentes de la musculature, règle la tension des fibres musculaires
- 3) elles guident la mandibule vers la relation centrée durant le stade terminal de fermeture
- 4) elles guident les dents antagonistes des segments postérieurs en relation centrée
- 5) dans les rapports excentrées, elles préviennent les contacts angulaires et les interférences entre les dents antagonistes
- 6) elles évitent les contraintes horizontales qui endommageraient les tissus de soutien
- 7) elles évitent les troubles de la musculature, des ligaments et de l'ATM *
- 8) elles évitent l'attrition des cuspides antagonistes préservant ainsi leur efficacité de cisaillement
- 9) elles servent à maintenir la relation verticale et la relation centrée.

* ATM : articulation temporo-mandibulaire

D'après une étude faite sur les Indiens de Californie d'avant l'immigration blanche, d'AMICO reconnaît que le mode de préparation alimentaire (broyage dans les mortiers), la cuisson à feu ouvert incorporant la poussière et le carbone, sont causes de l'usure. Celle-ci a grandement diminuée avec l'immigration et l'apport culturel européen.

Cependant, si la relation bout à bout des dents antérieures était héréditaire et fonctionnelle, elle se retrouverait aujourd'hui, ce qui n'est pas le cas.

Les gnathologistes refutant la théorie de l'occlusion balancée où "le rôle de la canine est de fonctionner à l'unisson avec les autres dents, et non pas comme une entité indépendante" (ALEXANDER ⁽²⁾), certains parodontologistes comme ORBAN ⁽⁵⁰⁾, recommandent un meulage sélectif mettant toutes les cuspides antagonistes, y compris la canine, en contact dans le mouvement balançant.

PRUZANSKI ⁽⁵⁶⁾ appliquant cette technique sur le côté travaillant sans altérer l'autre côté, a déduit des enregistrements électro-myographiques que la force appliquée par le masseter était d'un rapport de 3 à 1 côté canine réduite, et de 1 à 1 côté canine non meulée. Cette expérience met en évidence le rôle proprioceptif de la canine, assurant une régulation de la force appliquée.

STUART ⁽⁶⁶⁾ un des pères fondateurs de la gnathologie rejette les théories de la sphère, de l'occlusion bilatérale balancée, du maximum de contacts dans toutes les positions de fermeture, de la participation de toutes les dents pour une répartition égale des forces. Bien au contraire, il milite pour l'occlusion unilatérale, l'indépendance fonctionnelle des divers groupes de dents, et en particulier de celle de la canine. A partir de la relation centrée, lors d'un mouvement de protrusion ou de latéralité, il se produit une ouverture immédiate. En position de protrusion, les cuspides ont un contact punctiforme avec les 1ères prémolaires inférieures; en position de latéralité, seules les canines antagonistes ont un contact. "Les molaires se portent au mieux, quand les cuspides de soutien peuvent entrer et sortir de leurs fosses antagonistes, sans collision et sans frottement, et quand les cuspides de cisaillement peuvent glisser les unes près des autres, mais sans contact, ainsi un travail peut s'effectuer avec peu ou pas de friction". Déjà SHAW ⁽⁶²⁾ en 1924 disait que les dents devaient masitiquer sans collisions, et que les contacts occlusaux devaient aller en diminuant quand le mandibule quitte la relation centrée.

L'occlusion pronée par les gnathologistes est appelée occlusion "sans friction"; elle est rendue possible entre autre, par le rôle que jouent les canines.

IV - LES FACETTES D'ATTRITION

Les différences d'opinion qui apparaissent entre les anthropologues, ethnologues et leurs partisans d'une part, et les gnathologistes d'autre part, tiennent essentiellement à ce que les premiers s'intéressent à l'anatomie descriptive de crânes et de dentures appartenant à des sociétés préhistoriques ou primitives, alors que les seconds s'intéressent davantage à la physiologie de nos contemporains. Or, ce qui était, il y a des milliers d'années ne l'est pas pour nos sociétés civilisées : l'usure accentuée régulière et généralisée des arcades dentaires du type hélicoïdal est l'exception.

Par contre, ce que l'on observe fréquemment ce sont les facettes d'attrition, de surface inégale, et réparties inégalement sur les faces occlusales.

WEINBERG ⁽⁷¹⁾ se base sur l'observation de ces facettes pour conseiller un meulage sélectif de rééquilibration. BEYRON ⁽⁸⁾ sans mettre en évidence les causes de l'attrition constate sur une période de 12 à 20 ans, des modifications occlusales telles l'apparition de facettes d'attrition. L'usure dépend du type de mastication multidirectionnel, à prédominance bilatérale, à prédominance sagittale et à prédominance unilatérale. Les gnathologistes, et entre autre REYNOLDS ⁽⁵⁷⁾ explique l'origine de la formation des facettes par le fait du défaut de superposition entre la relation centrée et l'intercuspitation maximum, et par le fait que la canine ne joue pas son rôle de désocclusion, ou de désengagement immédiat des multiradicules.

V - L'EMAIL USE

L'aboutissement des divers processus envisagés : usure hélicoïdale de l'arcade dentaire du type primitif, apparition de facettes occlusales, indépendamment du mécanisme physiologique, est au point de vue microscopique, la formation d'un émail usé.

DAHLBERG ⁽²¹⁾ et GRIMBERT ⁽²⁵⁾ utilisant la méthode des répliques par applicateur d'un vernis cellulosique, examinent ces répliques au microscope à contraste interférentiel. L'émail non soumis au frottement (dents incluses) ou peu soumises au frottement (faces vestibulaires de incisives et canines supérieures) présente :

- une structure annelée, caractéristique de la présence de périkymaties (résultat de la fusion à la surface de l'émail de 2 ou plusieurs stries de Retzius)
- l'absence de rayures
- des espaces interprismatiques larges.

Dans 65% de dents jeunes, 8 à 15 ans, on trouve cette structure ou une structure sans périkymaties, avec prismes plus ou moins concaves et quelques rayures.

Dans 70% de dents âgées, 50 à 60 ans, il n'y a plus aucune structure, de nombreuses et profondes rayures, peu ou pas de périkyrmies, ni d'extrémités de prismes, et la surface présente une résistance réduite à l'usure.

L'émail soumis à la friction directe, celui des faces occlusales, subit des modifications importantes qui sont fonction :

- de l'état de surface
- de la nature de l'agent abrasif
- de la durée
- de l'intensité d'action
- de la microdureté de la surface
- de l'emplacement de la dent.

DAHLBERG note la présence de nombreuses rayures, suivant une ou deux directions principales, selon la translation du condyle, donnant parfois l'aspect d'un arc gothique. Mais en général, l'attrition donne des surfaces polies et sans tâches.

BARON ⁽⁶⁾, de même a noté la présence de rayures disposées selon les axes principaux des déplacements dento-dentaires, par rapport aux mouvements préférentiels du castor, du boeuf, de la panthère et du porc. Ces rayures sont attribuées à la présence de corpuscules abrasifs, d'origine alimentaire, ou provenant de la fragmentation de l'émail, alors que la friction directe émail sur émail donne un aspect poli et sans rayures.

VI - LES CONDITIONS CLINIQUES DU FROTTEMENT AU NIVEAU CANINES

1) Agénésie

La condition première est la présence de dents antagonistes. En cas d'agénésie de la canine, une autre dent ou un groupe de dents peuvent assurer son rôle; rapidement, apparaissent sur les arcades un nombre plus ou moins grand de facettes d'attrition (REYNOLDS ⁽⁵⁷⁾). Cette agénésie peut être à l'origine de para-fonctions, tel le bruxisme, et entraînera un processus d'auto-destruction (DRUM ⁽²³⁾).

2) Anthropométrie

Les références anthropométriques renseignent sur la situation de la canine par rapport à différents points ou plans faciaux (IZARD ⁽³¹⁾). Le tracé de BALLARD selon la méthode angulaire donne l'inclinaison de l'incisive supérieure avec le plan de FRANCFORT : 107° et pour l'incisive inférieure 90° avec la base mandibulaire. LACOUR ⁽³⁸⁾ reprenant ces observations note une inclinaison de l'I de $109^{\circ}26'$ et de $102^{\circ}46'$ pour la canine.

3) Morphologie et rapports des canines

La morphologie et les rapports "overbite et overjet" sont des conditions essentielles pour notre étude de l'usure par friction. Nous plaçant dans la perspective gnathologique, c'est-à-dire dans l'idéal d'une occlusion organique (THOMAS ⁽⁶⁷⁾), nous en appliquons les principes, à savoir, au recours à une coronoplastie quand il s'agit de dents naturelles ou de remodélage prothétique de la canine de telle sorte qu'elle puisse assurer son rôle de protection de l'occlusion. Il s'agit soit de rétablissement de la "fonction canine" (SCOTT et BAUM ⁽⁶¹⁾), soit de "réhabilitation" occlusale (LAURITZEN ⁽³⁹⁾, POSSELT ⁽⁵⁴⁾, STUART ⁽⁶⁶⁾).

Le concept gnathologique a donné naissance à une nouvelle technique de construction des cires, dite "waxing-up" ou technique du goutte à goutte, mise au point par PAYNE ⁽⁵²⁾, STUART ⁽⁶⁵⁾, THOMAS ⁽⁶⁷⁾, LUNDEEN ⁽⁴⁰⁾, concept d'après lequel il n'y a pas de ligne droite ni de surface plane. Les dents n'ont que des surfaces concaves ou convexes, de telle sorte que les rapports de contact ne se font que par des points.

Pour THOMAS ⁽⁶⁷⁾ une surface totale des contacts réduite, augmente l'efficacité masticatoire et diminue le risque d'usure par frottement. Il faut donc éliminer les rapports de glissement; les seuls qui sont tolérés, se situent entre :

- les incisives inférieures et supérieures
- les canines inférieures et supérieures, et seulement au cours des mouvements utilisés pour le "diagnostic mouvements".

Les rapports canine à canine qui nous intéressent, se font ainsi :

- crête marginale mésiale / plan distal du versant externe
- crête marginale distale / plan mésial du versant externe de la 1ère prémolaire inférieure.

4) Occlusion et friction

La nature étant très polymorphe, ne peut se réduire à des schémas simples. Pour essayer de comprendre le mécanisme de son fonctionnement, il est donc nécessaire d'établir des hypothèses, des théories, des concepts d'autant plus si nous, nous voulons dans une certaine mesure, recréer un des éléments de la nature, telle par exemple, une "réhabilitation" orale.

La multiplication des concepts de l'occlusion (SAADOUN ⁽⁵⁹⁾) témoigne qu'aucun d'eux ne soit le seul vrai, mais ils ne se contredisent pas nécessairement :

"Si chez un patient, la RC correspond à l'OCH^{*}, il n'y a aucune évidence à créer un LONG CENTRIC

* OCH : occlusion centrée habituelle

"Si un patient présente une différence entre la RC* et l'OCH, et si seules quelques dents nécessitent une restauration, il n'y a pas d'évidence pour faire coïncider ces deux relations".

Dans l'étude que nous poursuivons, nous pouvons nous référer, soit au concept du LONG CENTRIC de PANKEY - MANN ⁽⁵¹⁾ et SCHUYLER ⁽⁶⁰⁾, soit au concept du POINT CENTRIC des gnathologistes : dans les deux cas, il y a participation de la canine, soit par la fonction de groupe, soit par la fonction de protection canine.

Dans le concept de JANKELSON ⁽³³⁾, les canines ne participent pas aux mouvements et excursions et ne peuvent donc subir d'usures par frottements. L'usure qu'elles subissent est consécutive à la fonction masticatrice (cette usure n'est pas envisagée dans cette étude).

La position et la morphologie des canines jouent un rôle important dans les fonctions de groupe et de protection canine. Les mouvements mandibulaires entraînent le contact, le glissement entre les canines. Les mouvements dépendent :

a) des déterminants postérieurs : pente condylienne, mouvement et angle de BENNETT, distance dents-condyles, distance intercondylienne.

Les déterminants postérieurs commandent la forme des cuspidés postérieures.

b) des déterminants antérieurs : les dents antérieures commandent les mouvements excentrés de la partie antérieure de la mandibule. La concavité des faces palatines des dents antérieures dépend des déterminants postérieurs, de la courbe de SPEE, du plan d'occlusion, de l'"overjet" et "overbite".

Dans le cas de "réhabilitations" occlusales, il est possible de choisir le LONG CENTRIC ou le POINT CENTRIC. Dans la période de début d'utilisation, l'une et l'autre "réhabilitation" sont bien tolérées par le système neuro-musculaire. Cependant, en se référant aux travaux de d'AMICO et des gnathologistes, le POINT CENTRIC offre plus d'avantages que le LONG CENTRIC. Ce dernier en effet, varie avec le temps : 0,86 mm chez l'enfant, 1,25 mm chez l'adulte; les condyles n'ayant pas de position de référence précise dans les cavités glénoïdes, peuvent provoquer du fait d'un manque de stabilité, des troubles de l'A.T.M. Le LONG CENTRIC peut développer avec le temps un LONG CENTRIC plus long, par le fait de l'usure des faces proximales et du développement mésial physiologique des dents. Le LONG CENTRIC est, selon LAURITZEN ⁽³⁹⁾ "une invitation au bruxisme". Le FREEDOM in CENTRIC (LONG + WIDE CENTRIC) créé un champ de frottement entraînant l'usure des faces occlusales, ayant pour conséquence une diminution de la DVO (dimension verticale d'occlusion).

Enfin, le manque de références précises fournies à l'articulateur semi-adaptable, risquent de créer un "FREEDOM in CENTRIC" différent entre les couples de dents antagonistes contigus, avec pour résultat des usures inégales et des micro-déplacements dentaires qui peuvent être la cause de troubles au niveau de s tissus de soutien de l'A.T.M. et du système neuro-musculaire.

* RC : relation centrée

Les réalisations en POINT CENTRIC permettent une précision plus grande avec un articulateur entièrement adaptable; les rapports cuspides-fosses peuvent être contrôlés d'un couple de dents à l'autre, afin d'avoir des points de contacts supportant la charge occlusale également répartie. L'apparition d'un LONG CENTRIC si celui-ci doit apparaître, est différé dans le temps, d'autant plus que le POINT CENTRIC peut, sans dommage, se déplacer vers l'avant du fait de la fermeture en arc de cercle de la mandibule.

5) Aire de frottement

L'apparition des facettes d'usure est donc liée à l'existence de la "slide"^{**}, donc au trajet parcouru par la mandibule pour aller de l'OCH vers l'ORC^{*}. Divers auteurs ont donné des estimations moyennes de ce mouvement antéro-postérieur :

1,25 mm	$\pm$ 1	dans 80%	de 50 dentures normales (POSSELT ⁽⁵⁴⁾)
1,03 mm	$\pm$ 0,43	dans 93%	sur 100 dentures sans troubles de l'ATM (DONOVAN ⁽²²⁾)
0,87 mm	$\pm$ 0,35	dans 100%	des cas (KYDD ⁽³⁷⁾)
0,85 mm	$\pm$ 0,35	dans 100%	des cas (INGERVALL ⁽³⁰⁾).

HODGDE et MAHAN⁽²⁷⁾ ont calculé en outre les composantes verticales et latérales; les valeurs moyennes sur 10 sujets sont les suivantes :

composante antérieure	:	0,44 mm	$\pm$ 0,54	(44 sujets sans slide 57 sujets avec slide)
composante verticale	:	0,47 mm	$\pm$ 0,64	(47 sujets sans slide 54 sujets avec slide)
composante latérale	:	0,01 mm	$\pm$ 0,29	(86 sujets sans slide 15 sujets avec slide)

Ces auteurs notent :

- que plus l'occlusion est bonne, plus petite est la distance OCH -ORC
- que la slide latérale est un mouvement anormal ; cela confirme le rôle de dis-occlusion immédiate joué par la canine (Mac COLLUM, STUART, A research report, 1955), et confirme l'opinion de RICKETTS dans sa critique du travail de BRODIE⁽¹³⁾ que "l'usure occlusale, particulièrement celle des dents postérieures, ne se produit qu'après une forte usure des canines".

PREISKEL⁽⁵⁵⁾ a mis en évidence les rapports existants entre l' "overbite"^{***} et l' "overjet" de la canine et le mouvement de BENNETT, c'est-à-dire, le déplacement latéral du condyle travaillant lors de la disocclusion canine.

* ORC : occlusion de relation centrée

** slide : pente de glissement

*** overbite - overjet : surplomb vertical et horizontal

Sur 18 sujets dont :

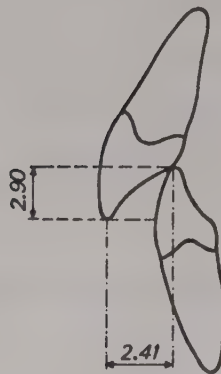
- 3 n'ont pas de contact en OCH entre les canines antagonistes
- 8 ont un contact entre canines supérieure et inférieure
- 7 ont un contact entre canine inférieure et 1ère prémolaire inférieure

il a été calculé :

- un "overjet" moyen de 2,41 mm $\pm$ 0,81
- un "overbite" moyen de 2,90 mm $\pm$ 1,54

Le déplacement moyen de la canine inférieure sur la canine supérieure jusqu'au bout à bout est de 4,63 mm $\pm$ 1,14.

Le mouvement moyen de BENNETT est de 1,07 mm $\pm$ 0,54 . Il représente environ le 1/4 du déplacement de la canine inférieure.



VII - CONCLUSION

De cette première partie, on peut retenir essentiellement que :

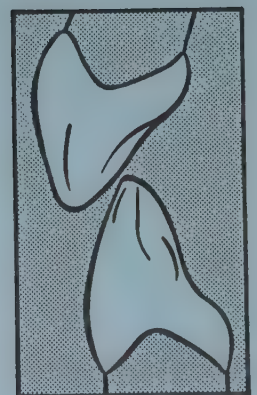
- l'usure étendue des dentures des hommes préhistoriques ou des tribus primitives, est un processus constant, dépendant des variations culturelles
- l'usure des dents chez les peuples civilisés se traduit par l'apparition progressive de facettes d'attrition
- pour les gnathologistes, l'attrition est un signal d'alarme et elle est souvent consécutive au manque de coïncidence entre l'OCH et l'ORC
- la canine joue un rôle fondamental dans la préservation d'une occlusion sans friction
- le contact des canines opposées est punctiforme, et la désocclusion est immédiate
- l'émail usé par attrition se présente sous un aspect poli, sans tâche et sans rayures.

Dans une occlusion organique idéale, naturelle ou reconstituée, les canines remplissent un rôle "anti-friction" vis à vis des autres dents. C'est à leur niveau, après un usage plus ou moins prolongé, que peut débiter une usure par attrition, ayant dans un second temps une conséquence sur l'occlusion ou les tissus de soutien.

Il est donc intéressant sur un plan technologique, de constater le processus de l'usure par friction, entre les couples émail / émail, émail / matériaux prothétiques, afin de définir les critères du choix et un matériau assurant une vie longue à l'occlusion ou aux éléments prothétiques qui ont participés à son rétablissement.

CHAPITRE II.

USURE ET PROPRIETES DES MATERIAUX



I - CARACTERISTIQUES MECANQUES

1) La dureté

Dans un précédent travail ⁽³⁴⁾, nous avons essayé de sélectionner parmi les multiples caractéristiques des métaux, celle qui aurait une valeur synthétique de référence. Le diagramme suivant groupe un certain nombre de caractéristiques mécaniques, où il apparaît, sans qu'il y ait toujours de relations mathématiques que :

- dureté	}	évoluent dans le même sens
- charge de rupture		
- module de Young		

alors que :

- allongement	}	évoluent dans le sens inverse
- résilience		

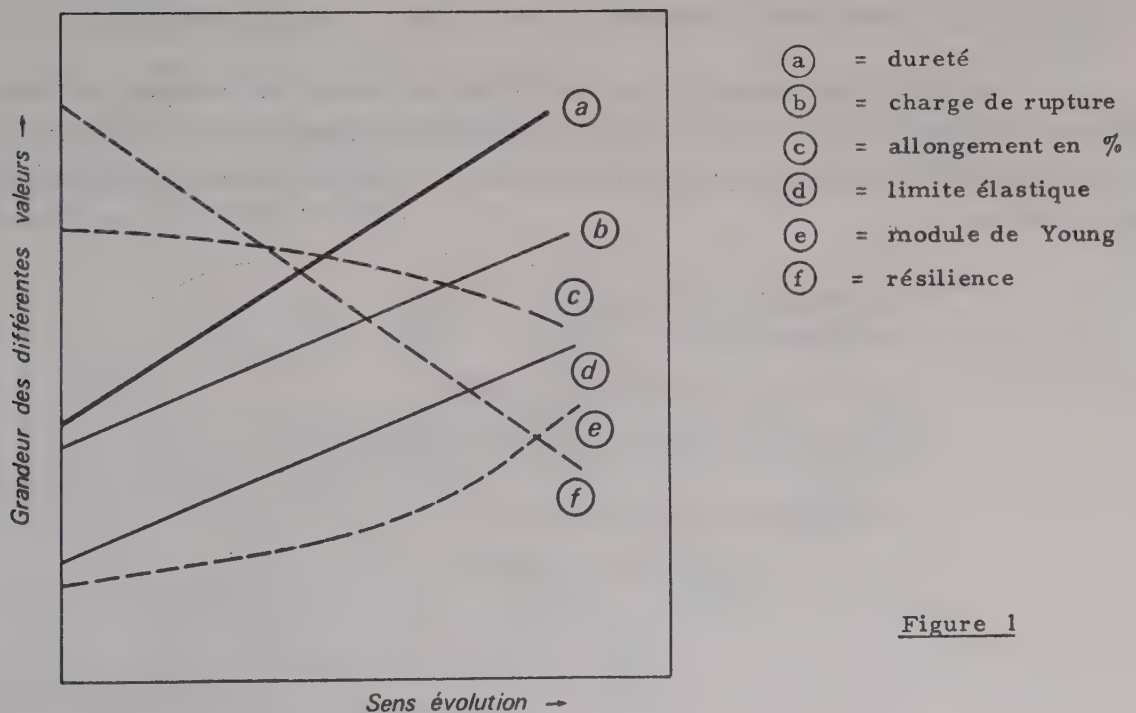


Figure 1

Dans ce travail, il nous avait paru que la dureté était le critère le plus caractéristique; l'indice de dureté indique la résistance d'un matériau à la pénétration; elle dépend de la charge et traduit un comportement plastique :

$$H = \frac{F}{S} = \frac{\text{charge}}{\text{section}}$$

alors que le module de Young :

$$E = \frac{F}{S} \times \frac{L}{l} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} L = \text{la longueur d'origine} \\ l = \text{l'augmentation de longueur} \end{array}$$

exprime le comportement d'un matériau dans le domaine élastique.

2) Analyse critique de la dureté

Les techniques utilisées pour exprimer la "dureté" sont variées et leur nombre témoigne de la difficulté à exprimer mathématiquement cette notion apparemment facile à saisir. Parmi les diverses méthodes statiques, les rayures, l'abrasion ou la pénétration peuvent servir de moyens pour apprécier la dureté. Les divers essais ne permettent d'obtenir que des valeurs relatives, facilitant le classement d'un matériau par rapport à l'autre.

Les paramètres intervenant lors de la réalisation d'une empreinte dépendent essentiellement de :

- la nature du matériau
- de sa forme
- de la force appliquée.

Les essais de micro-dureté utilisent de faibles charges (de quelques grammes à quelques centaines de grammes). En conséquence, les valeurs obtenues par divers chercheurs, pour ce type d'essai, présentent en général, une dispersion. L'indice de micro-dureté peut-être affecté aussi par :

- les effets d'inertie
- les vibrations
- le temps d'application de la charge
- les variations dans la forme des pénétrateurs
- l'opération lors de la mesure des diagonales de l'empreinte
- la préparation des surfaces
- la micro-structure des matériaux
- l'angle d'attaque du pénétrateur.

Par ailleurs, l'absence de relation linéaire entre la charge appliquée et l'indice mesurée ne permet pas de comparer les essais faits sous faibles charges.

On peut dire avec CAUBET ⁽¹⁷⁾ à propos des essais de dureté que :

- c'est une mesure qui bouleverse ce qu'elle est supposée mesurer
- elles n'apprécie qu'une réaction complexe d'un métal à une sollicitation inconnue en mécanique courante, réaction où le matériau fait intervenir :

- . sa limite élastique
- . sa charge de rupture
- . un taux d'écrouissage impossible à apprécier
- . un coefficient de frottement perturbé par des micro-soudures et

des arrachements.

3) Caractéristiques des contraintes-déformations à l'état dynamique (SKINNER ⁽⁶⁵⁾)

Les caractéristiques mécaniques des métaux les plus intéressantes, la dureté et le module de Young qui caractérisent respectivement le comportement plastique et le comportement élastique, ne rendent pas compte, à elles seules, du comportement des corps quand ils sont animés d'une énergie dynamique.

a) La densité d'énergie ressort D.E.R.

Dans le cas de deux corps en mouvement et subissant des contacts, c'est le cas dans l'occlusion, apparaît la notion de charges "dynamiques". Ces charges s'exercent dans un temps très court, et il n'est pas possible de mesurer les déformations; par contre, on peut mesurer l'énergie transmise à la structure. Cette énergie, toujours dans la limite de proportionnalité, peut-être restituée, c'est donc une énergie potentielle (appelée "résilience" en anglais, qu'il ne faut pas confondre avec le mot français "résilience" indiquant une résistance au choc, et qui se situe au-delà de la limite élastique).

Cette énergie de déformation élastique, ou densité d'énergie ressort (D.E.R) est la somme d'énergie accumulée dans un corps, quand l'unité de volume du corps subit une charge allant jusqu'à sa limite élastique :

$$D.E.R. = \frac{P^2}{2E} = \frac{\text{carré de la limite élastique}}{\text{double du module de Young}}$$

où la D.E.R. est exprimée en énergie par unité de volume :

$$\text{kg} - \text{cm} / \text{cm}^3 \quad \text{ou} \quad \text{déci} - \text{joule} / \text{cm}^3$$

b) La force d'impact

La force d'impact, quant à elle, caractérise une force dynamique lors de la collision de deux solides. On ne peut mesurer directement cette force, mais on peut mesurer

l'énergie reçue par le corps. La capacité d'un corps à résister à la force d'impact, sans déformation permanente est proportionnelle à la D.E.R. :

$$I = k.V \frac{P^2}{2E}$$

où k , constante de proportionnalité, représente les facteurs structuraux qui sont importants dans la capacité de résistance à l'impact. V représente le volume; l'augmentation du volume augmente la résistance à l'impact, ce qui a une importance dans les reconstructions prothétiques. L'augmentation du module E diminue la résistance à l'impact, il devra cependant, être élevé pour que le matériau ait une rigidité suffisante sous contrainte.

4) Le critère d' OBERLE (49)

Dans ses études sur l'usure des métaux, OBERLE remarque que :

- plus la dureté est grande, plus la limite de déformation plastique est élevée
- plus le module E est élevé, plus la déformation plastique est faible.

Il établit ainsi une relation caractéristique du comportement d'un métal face à l'usure, qu'il appelle "Modell Factor" :

$$\text{Modell} = \frac{\text{BHN}}{E} \times 10^6 = \frac{\text{dureté}}{\text{module Young}}$$

Ce critère donne une indication de la profondeur de la pénétration qu'un métal peut tolérer sans dépasser sa limite élastique.

Pour obtenir un "Modell" élevé, ce qui implique la faculté d'un matériau à résister à l'usure, il faut, soit augmenter la dureté de surface, soit diminuer le module de Young.

Il suggère de combiner les tests de dureté et les tests de mesure du module d'élasticité, au lieu de ne tenir compte que de la seule dureté, comme indice de stabilité d'une surface résistant à l'usure.

II - L'USURE

1) Définition

"L'usure est l'enlèvement non souhaitée de matière d'une surface solide, comme résultat d'une action mécanique" (COURTEL (20)).

"L'usure est le phénomène qui constitue l'enlèvement de matière à la surface d'un corps, sous l'influence du frottement" (l'HERMITE (29)).

La notion d'usure est donc intimement liée à celle du frottement, donc au contact entre deux solides animés d'un mouvement relatif. Cependant, un solide peut aussi être en contact avec un fluide et donner lieu aux phénomènes d'érosion et de cavitation.

2) Les paramètres

Les paramètres intervenant dans le phénomène de l'usure, sont pour l'HERMITE (29):

- la nature du corps usant
- les formes macroscopiques des corps en contact
- la nature du mouvement relatif
- la vitesse du mouvement relatif
- la nature de la matière à l'interface (air, liquide, abrasif)
- la température extérieure, l'humidité
- la présence de matière enlevée
- la forme géométrique de l'usure
- les actions chimiques accompagnant l'usure (corrosion) (BRUGIRARD (14)).

Le coefficient de frottement n'apparaît pas explicitement, mais il dépend de quelques paramètres ci-dessus cités, et sera envisagé dans le chapitre sur le frottement.

3) Les procédés de mesure

Il existe un grand nombre d'appareils et de procédés pour mesurer l'usure; cela tient au fait que le processus de l'usure est encore plus mal défini que la notion de dureté.

Les procédés de mesure les plus simples consistent à apprécier les variations de poids et de longueurs. La pesée (volume en cc^3 , ou en poids) donne une information sur l'usure globale d'une pièce.

La mesure de longueur donne une information isolée. Dans les deux cas, on ne connaît pas la vitesse instantanée d'usure (en grs/sec ou en grs/mm de longueur).

Les procédés plus complexes sont entre autres :

- les méthodes d'examen optique en contraste interférentiel
- la méthode d'examen par microscopie électronique, associée à la méthode des répliques
- les méthodes des isotopes radioactifs, pour détecter des particules d'usure de 10^{-13} à 10^{-11} grs.

4) Essai de classification

Du fait de la complexité du phénomène de l'usure, toute classification est quelque peu arbitraire. Elle peut être faite :

- soit d'après le mode de rupture des jonctions de frottement (KRAGELSKY (36))
- soit d'après le mécanisme de l'usure (BURWELL (16)).

a) La classification de KRAGELSKY ⁽³⁶⁾ est illustrée par les figures suivantes :

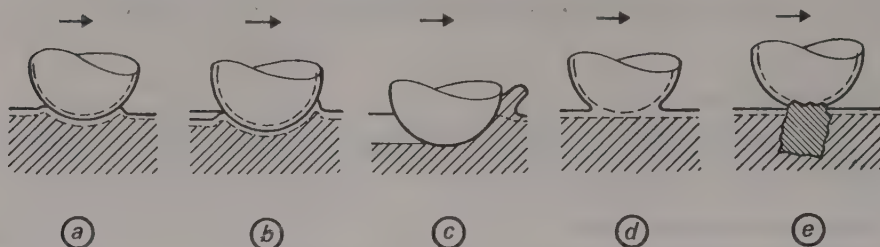


Figure 2

Elles décrivent les différentes étapes de l'usure :

- (a) déformation élastique
- (b) déformation plastique
- (c) cisaillement
- (d) arrachement par transfert atomique
- (e) arrachement par macro-transfert (micro-coupe)

(a) et (b) représentent le mode de déformation de la surface

(c), (d), et (e) représentent le mode de rupture sur les différents mécanismes de l'usure décrit ci-dessous.

b) La classification de BURWELL ⁽¹⁶⁾ est basée sur les différents mécanismes agents d'usure : adhésion et corrosion qui correspondent à des actions moléculaires; abrasion et fatigue de surface qui correspondent à des actions mécaniques.

5) Mécanisme de l'usure

Le mécanisme de l'usure a lieu par actions moléculaires et par actions mécaniques, suivant la classification de BURWELL.

a) Actions moléculaires

α - L'usure par adhésion est le mode d'usure fondamental, lié à la friction directe, et qu'on ne peut éviter. D'après BOWDEN et TABOR ⁽¹¹⁾, ce processus entraîne un transfert de métal sur la surface opposée; et l'on se retrouve dans le cas de la friction de deux métaux de même nature. Cependant, cette néo-couche transférée est rapidement détruite, au fur et à mesure de son épaissement.

La dureté relative des matériaux (ou leur durcissement par écrouissage) devient un facteur principal de résistance à l'usure. Cela confirme la sélection de la caractéristique dureté, faite précédemment, comme critère "anti-usure".

L'usure peut obéir à la loi de KERRIDGE et LANCASTER ⁽³⁵⁾ :

$$W = \frac{k}{H_n}$$

W = volume utilisé

H_n = dureté du matériau

k = coefficient d'usure

ou à la loi de HOLM (28) :

$$W = \frac{zP}{Hn}$$

P = charge

z = enlèvement d'un atome de la surface

ou à la loi de BURWELL et STRANG (16) :

$$\frac{W}{L} = \frac{kP}{pf}$$

L = distance parcourue

pf = pression de fluage

Le tableau d' ARCHARD et RABINOWICZ donne une idée de la valeur du coefficient k :

Conditions	Métal sur métal		
	semblable	différent	Non métal sur non métal
Surfaces sèches	5×10^{-3}	10^{-4}	5×10^{-5}
Lubrification limite	2×10^{-2}	10^{-4}	5×10^{-5}
Lubrification moyenne	10^{-5}	10^{-5}	5×10^{-5}
Lubrification en excès	10^{-6}	10^{-5}	10^{-6}

Tableau 1 : Coefficient d'usure k pour différentes conditions de glissement.

Pour ARCHARD (4), la vitesse d'usure est au début, proportionnelle à la charge appliquée; l'usure semble augmenter avec la hauteur des aspérités; la vitesse d'usure diminue avec le temps (plus la surface est polie, plus l'usure est lente).

β - L'usure par corrosion de frottement. Elle se manifeste par une abondante formation d'oxyde. La corrosion se produit en présence d'agents corrosifs : O_2 , H_2O , CO_2 , acides organiques, etc ... Elle se révèle très nocive dans le cas de frottement, de glissement, car elle donne un produit de réaction chimique éliminé par le frottement (BRUGIRARD⁽¹⁴⁾) favorisant ainsi une corrosion permanente. Le lubrifiant peut être un inhibiteur de la corrosion.

b) Actions mécaniques

α - L'usure par abrasion est le résultat des effets de chariotage d'une surface molle par une surface dure : la surface dure étant rugueuse produit un véritable limage. L'influence de l'état de surface est primordiale, on constate :

- une amélioration de l'état de surface, après le rodage initial, et donc un ralentissement de l'usure. Si l'usure demeure constante, c'est que l'état de surface initial n'a pas changé.

- une usure plus grande, quand les stries résultant de l'usinage, de la rectification ou du polissage sont parallèles au déplacement, que lorsqu'elles sont perpendiculaires.

- un coefficient de frottement statique, au début du choc, supérieur au coefficient de frottement cinétique, dans le cas de glissement

L'abrasion peut être aussi le résultat de l'interposition de particules pressées entre les surfaces, ces particules provenant de la fragmentation de matériaux cassants (émail, porcelaine, verre, etc ...), ou provenant des produits de la corrosion ou d'apports extérieurs. Les particules provenant des surfaces sont écrouies et leur dureté devient plus élevée que le matériau d'origine; elles deviennent ainsi un agent abrasif.

Pour BURWELL ⁽¹⁶⁾, comme pour OBERLE ⁽⁴⁹⁾, les qualités à opposer à l'abrasion sont la dureté superficielle et le module de Young, la résistance à l'usure étant proportionnelle à la dureté et inversement proportionnelle au module E.

β - L'usure par fatigue de surface est plutôt liée au frottement de roulement sous forte charge, alors que les types précédents sont liés au frottement de glissement. L'usure par fatigue provoque des piqures, des écaillages de surface; la détérioration est consécutive aux contraintes alternées de cisaillement, de compression et de traction, et de ce fait, elle est rapide.

6) Les étapes de l'usure

CAUBET décrit l'évolution de l'usure de la manière suivante :

1 - accommodement des aspérités superficielles : c'est le coup de râpe initial décrit par MARCELIN ⁽⁴³⁾; ce coup de râpe provoque une augmentation de l'étendue de surface, et une meilleure répartition de la charge par destruction des aspérités superficielles. A ce stade, il y a une grande émission de copeaux et d'éléments abrasifs.

2 - ruptures et arrachements des soudures, avec transfert de métal, molécule par molécule, sur la face frottante la plus dure. Il y a donc "usure" du corps le plus doux.

3 - consommation chimique à l'interface (oxydes)

4 - abrasion par les copeaux écrouis, devenus plus durs que les matériaux en présence, accélérant l'érosion des surfaces.

5 - corrosion par formation d'oxydes à l'interface

6 - écrouissage par contraintes normales et sollicitations tangentielles provoquant des déformations permanentes allant jusqu'aux fractures.

Une pièce métallique subit 3 étapes principales :

- le rodage, avec usure très rapide, à vitesse régulièrement décroissante

- la marche normale, avec usure faible et constante, durant la vie de la pièce
- le vieillissement et la mort, avec reprise d'une usure à vitesse croissante.

L'usure est le résultat d'une action, celle du frottement. L'étude du frottement permet d'affiner la connaissance des forces s'exerçant à l'interface.

III - LE FROTTEMENT

1) Définition

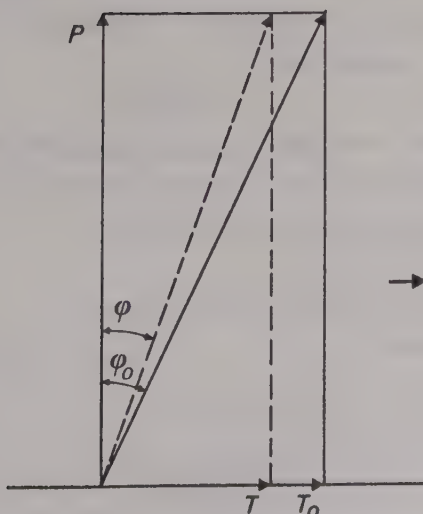
Pour LITTRE, frotter, c'est "soumettre un corps au contact d'un autre corps, que l'on fait passer sur lui, en appuyant"; alors qu'user c'est "détériorer imperceptiblement les choses en les diminuant à force de s'en servir et notamment les diminuer par le frottement".

Le frottement entraîne une perte d'énergie : 20% pour une voiture, 9% pour un avion à piston, 2% pour un turbo-réacteur. Le frottement entraîne aussi le grippage et l'usure. Le frottement est cependant indispensable pour les différents moyens de locomotion : marche, transports, à l'équilibre des objets, etc... car sans lui, rien ne s'opposerait à l'action de la force centrifuge.

Le frottement est la résistance tangentielle à l'interface de deux corps, lorsque sous l'action d'une force extérieure, l'un des deux se meut ou tend à se mouvoir, relativement à la surface de l'autre. Cette relation entre déplacement et résistance se traduit par le coefficient de frottement.

2) Le coefficient de frottement

Il a été défini par COULOMB de la façon suivante :



soit une pièce prenant appui sur un plan horizontal et soumise à une charge verticale, pour déplacer ce corps, il faut exercer une force T_0 , parallèle au plan horizontal. L'angle φ^0 ou tangente φ^0 est le coefficient de frottement statique (ou coefficient d'adhérence, ou coefficient de démarrage).

Figure 3

Le coefficient de frottement subit des variations (CAUBET ⁽¹⁷⁾) en fonction :

- du temps : le coefficient statique ou de démarrage est plus élevé que le coefficient dynamique ou de marche
- de la vitesse : du fait de la déformation plastique des aspérités superficielles se transformant en un bourrelet frontal
- de la charge : du fait de la formation d'oxydes métalliques sur les interfaces en contact, en atmosphère ordinaire. En outre, la surface de protection étant brisée, l'effort au glissement s'accroît (glace sur neige)
- du gradient de la charge : le coefficient de frottement du couple acier-acier par exemple, diminue quand il y a application dynamique de la charge
- de la température : qui entraîne une diminution du module E et qui change l'étendue des domaines élastiques et plastiques du métal.

Le coefficient de frottement de deux métaux n'est donc valable que si on a fixé les conditions dans lesquelles il a été mesuré : température, charge, vitesse et la nature des surfaces en contact.

3) L'interface

Le frottement se fait sur des surfaces ou interface ; il met en jeu les couches superficielles. Le frottement peut être envisagé, soit à l'échelle microscopique (inter-actions moléculaires, contact entre des aspérités, mécanisme des déformations), soit à l'échelle macroscopique, qui n'est que le résultat statistique des résultantes des phénomènes microscopiques.

Une surface idéalement plane n'existe pas : la surface d'un corps est une succession de pics et de crevasses, plus ou moins aigus et plus ou moins proéminents.

Le contact de deux surfaces a lieu, exclusivement par l'intermédiaire des aspérités qui s'écrasent les unes contre les autres; tout se passe d'après BOWDEN et TABOR ⁽¹¹⁾ comme si "on plaçait la Suisse renversée sur le Tyrol autrichien".

La surface réelle ne correspond pas à la surface technique : celle-ci a subi des déformations dues à l'usinage et à la finition. Les surfaces techniques ont des aspérités de $0,25 \mu\text{m}$, à $7,5 \mu\text{m}$ espacées de $1,25$ à $75 \mu\text{m}$; l'usinage provoque des aspérités :

- de quelques $1/10$ ème de mm pour une surface tournée
- de 10^{-2} à 10^{-1} mm pour une surface meulée
- de quelques μm pour une surface polie
- moins de $1 \mu\text{m}$ pour une surface superfine
- indécélable pour une surface polie électrolytiquement (COURTEL)

Le contour des surfaces est déterminée par divers procédés :

- le profilomètre (enregistrement de Talysurf), où le déplacement vertical d'une fine aiguille est enregistrée par un stylet
- sections obliques ou coupes de métallographie au-travers de la surface
- méthodes optiques interférentielles donnant des interférogrammes décalant en hauteur une aspérité de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière incidente
- diffraction électronique
- méthodes des répliques ou prise d'empreintes des aspérités avec un matériau plastique, puis analyse de la surface reproduite par rayons X, micrographie ou coupe optique.



Deux surfaces en contact, soumises à une charge P , ne subissent pas la contrainte unitaire $p = \frac{P}{S}$, car il n'y a qu'une fraction k des surfaces qui soit en contact, tel que le montrent les figures 4 et 5.

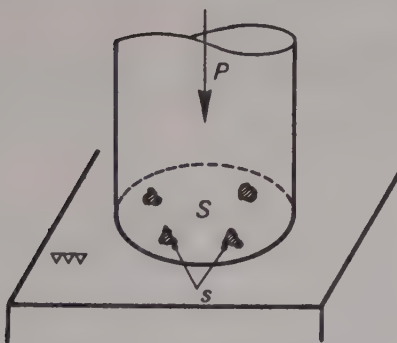


Figure 4

Aire effective de contact

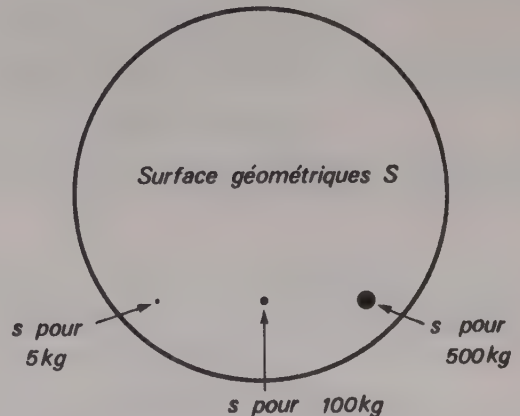


Figure 5

Ordre de grandeur des aires effectives "s" de contact pour des charges données.

La charge unitaire réelle p' peut être des centaines de fois plus élevée que la charge unitaire p .

- k dépend de la charge
- k dépend de la rigueur géométrique des pièces
- k dépend de l'état de surface

4) Structures géométriques des surfaces

La surface d'un solide tel qu'un plan, une sphère ... est définie théoriquement de façon géométrique. Un examen soigné de cette surface fait apparaître des aberrations géométriques qui marquent l'inexactitude d'une surface réelle par rapport à la forme théorique.

L'état géométrique d'une surface sera représenté par les défauts classés par leur ordre de grandeur et leur périodicité ou aperiodicité. En général, on retient 6 ordres de grandeur :

- deux caractérisent les défauts macrogéométriques :

a) les écarts de 1er ordre qui ont trait aux écarts de forme (défauts de planéité, de circularité ...). Ils sont en général dus aux imperfections géométriques des machines-outils.

b) les écarts du 2ème ordre caractérisent des ondulations engendrées lors de l'usinage par les vibrations de la machine-outil, de l'outil et de la pièce.

- les quatre autres ont trait aux irrégularités de faible amplitude souvent appelées rugosités ou défauts microgéométriques.

c) les défauts de 3ème ordre se rapportent aux striures dues à la forme de l'arête coupante de l'outil, à son orientation, à son avance

d) les écarts de 4ème ordre traduisent des arrachements ponctuels (écaillures, fissures, piqûres, cratères). Ils résultent du mode de fabrication.

- les écarts de 5ème et 6ème ordre ont trait à la structure cristalline de la matière et aux modifications apportées par l'effet de traitements chimiques ou thermiques.

Chacun de ces défauts peut avoir une importance primordiale en fonction des conditions d'utilisation et caractériser une surface, c'est évaluer l'ensemble de ces caractéristiques.

Quelques normes ont essayé de définir les critères de mesure ayant trait à la surface et au profil. Leur exploitation ne peut se faire valablement si l'on ne se réfère pas à la technologie particulière des appareils de mesure. Au nombre de 18, les critères ont trait :

- à la profondeur totale du profil total P_t

- à l'ondulation (W) :

profondeur totale d'ondulation	W_t
profondeur maximale	W_{max}
profondeur moyenne	W
moyenne des pas d'ondulation	AW

- à la rugosité (R) :
- | | |
|--|------------|
| rugosité totale | R_t |
| rugosité maximum | $R_{\max}$ |
| moyenne des profondeurs de rugosité..... | R |
| moyenne des pas de rugosité..... | AR |
- à des données statistiques :
- | | |
|--|----------|
| pourcentage de portée | $(Tp)_c$ |
| pourcentage de portée de l'ondulation..... | $(LW)_c$ |
| pourcentage de portée de la rugosité..... | $L R_c$ |
| profondeur d'aplanissement..... | R_p |
| écart moyen par rapport à la ligne moyenne | R_a |

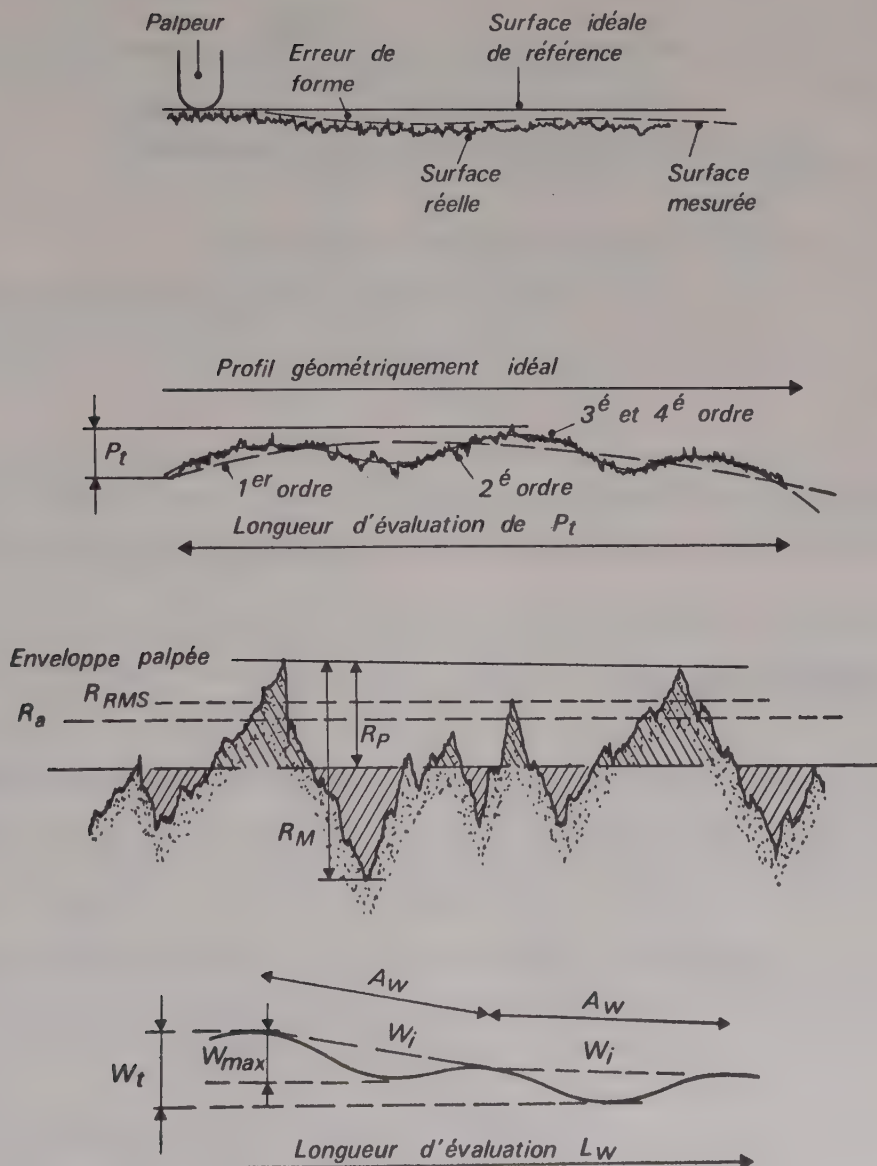


Figure 6

5) Les lois de frottement

Léonard de VINCI, au XVème siècle, avait déjà remarqué qu'un "frottement, produit par le même poids, sera d'égale valeur, au début du mouvement, même si le contact se situe sur des longueurs et des largeurs différentes".

En 1699, AMONTONS confirme ces constatations et définit les lois du frottement statique. En 1871, COULOMB les étend au domaine dynamique.

a) Lois du frottement statique d'AMONTONS

- la force de frottement est indépendante de l'étendue de la surface de contact entre les solides
- la force de frottement est proportionnelle à la charge située au-dessus de la surface de contact
- la force de contact dépend de la nature des interfaces.

b) Lois du frottement dynamique de COULOMB

- la force de frottement est, là aussi, proportionnelle à la charge
- la force de frottement est indépendante ou presque indépendante de la vitesse de glissement
- les matériaux ont un coefficient de frottement cinétique inférieur au coefficient de frottement statique (dans lequel interviennent la force d'inertie des corps et la résistance supplémentaire née du fait que le corps au repos a légèrement creusé la surface de contact).

6) Mécanique de surface

C'est l'analyse des déformations superficielles dues aux contraintes de contact. Elle englobe la notion d'élasticité et de plasticité, ainsi que les phénomènes physiques dues à l'effet thermique et à la vitesse.

a) La déformation élastique d'une surface plane sous l'action d'une aspérité hémisphérique obéit à l'équation de HERTZ :

$$d = \left[1,75 P . r . \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{1/3}$$

P = charge

E₁ et E₂ sont les modules de Young des deux solides

r. = rayon de la sphère

b) La déformation plastique d'un plan sous l'action d'une aspérité hémisphérique s'ajoute à la déformation élastique, au fur et à mesure que la charge augmente, jusqu'à atteindre la limite élastique d'un des métaux.

En augmentant encore la charge, on atteint la déformation plastique totale, obtenue par un test de dureté (la bille d'acier Brinell par exemple).

Dans le cas de la déformation, non plus du plan, mais de l'aspérité hémisphérique elle-même, s'ajoute un phénomène d'écrouissage qui accroît la micro-dureté de cette aspérité et augmente considérablement sa résistance à la déformation plastique.

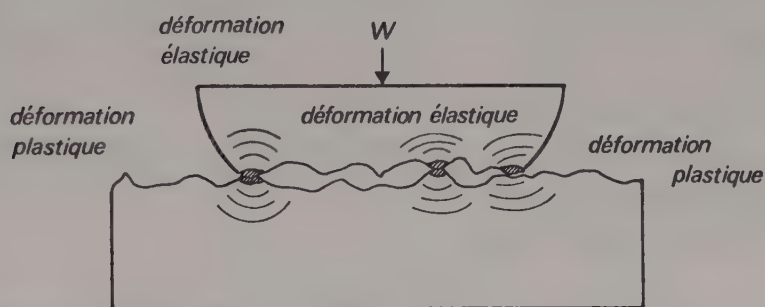


Figure 7

7) Mécanisme de frottement

Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, le mécanisme du frottement était expliqué par le rôle géométrique des aspérités, considérées comme rigides : le corps doit s'élever sur l'autre corps pour franchir les plans inclinés des aspérités; le coefficient de frottement était la tangente de la pente moyenne des aspérités.

Quand on connut les propriétés élastiques et plastiques BOWDEN et TABOR ⁽¹¹⁾ ont pu élaborer l'hypothèse de la théorie de l'adhésion et du cisaillement des jonctions. L'adhésion est :

"L'attraction d'origine moléculaire, qui s'exerce entre deux surfaces en contact indépendamment de la force extérieure appliquée pour les rapprocher"

"Le frottement consiste en une succession de friction des aspérités produisant de véritables micro-soudures à froid suivies de cisaillement provoqués par les efforts tangentiels"

On décompose alors la force de frottement en deux composantes, caractérisant ces deux processus :

$$T = T_1 + T_2$$

force de frottement = adhésion + labourage

La surface dure laboure la surface la plus douce, et provoque des arrachements. La surface la plus grande s'use et se lisse plus vite que la surface la plus petite; cette dernière, en effet, recevant plus d'énergie de frottement, s'écrouit de plus en plus vite, et devient donc plus dure.

Le mécanisme de la friction s'établit ainsi :

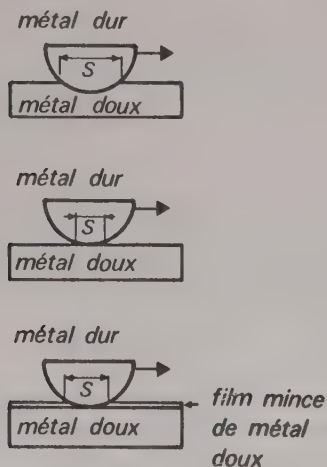
$$F = S.L.$$

F = force de frottement

S = surface de contact réelle (proportionnelle à la charge et indépendante des dimensions des corps)

L = densité moyenne d'arrachement

La densité moyenne d'arrachement L est expérimentalement égale au volume d'arrachement sur la surface la plus douce du couple de matériaux.



Dans le cas du frottement d'un métal dur sur un métal mou L est petit et S est grand.

Pour un métal dur sur un métal dur, L est grand et S est petit.

Pour le cas d'une couche mince de métal mou entre deux métaux durs, le coefficient de frottement est faible.

Figure 8

Un métal dur raye le métal mou; un métal mou se dépose en partie sur le métal dur, et un métal frottant sur lui-même donne toujours des arrachements importants.

8) Conséquence du frottement : usure et endommagement des surfaces

L'évolution des surfaces se superpose au mécanisme de l'usure décrit précédemment. On peut envisager les cas de friction de métaux et de solides non métalliques.

a) Friction des métaux

Le contact statique de deux solides provoque d'abord une déformation élastique, puis avec l'augmentation de la charge, une déformation plastique. La force tangentielle qui déplace un corps par rapport à l'autre entraîne la formation d'un bourrelet frontal ou butte formée par le matériau devant le frotteur qui traduit une déformation plastique en profondeur. Au stade suivant, se produisent des déplacements normaux à la surface frottée et le processus se poursuit jusqu'à la coupe : l'aspérité du frotteur repousse, laboure et saute la butte, donnant naissance à un mouvement saccadé, allant jusqu'à des vibrations entretenues par le mouvement. La coupe se traduit par la formation d'un copeau et une suite de grippages successifs (Figure 9).

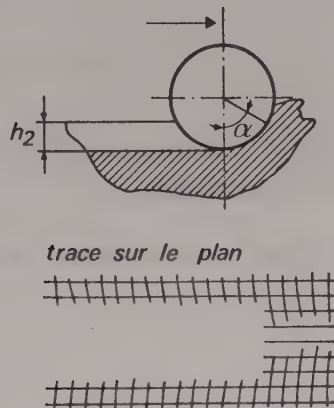


Figure 9

b) Frictions de solides non métalliques

- Matériaux cassants

En général, les matériaux cassants, tels le sel gemme, le verre, l'émail, la porcelaine, obéissent approximativement aux lois d' AMONTONS.

Les endommagements des interfaces sont différents; ils se font :

- . par fragmentations microscopiques, produisant de minuscules particules
- . par fêlures
- . avec transfert par collage sur des matériaux mous.

A la différence des métaux, il n'y a pas de grippage par accroissement des jonctions.

- Matériaux plastiques

Le mécanisme est à peu près le même que celui des métaux : adhésion, dommages superficiels, transfert de matière, déformation élastique puis plastique, fluage de matériaux. Cependant, le coefficient de frottement croît rapidement pour des augmentations de charges faibles, avec la vitesse et le temps de frottement.

L'usure croît avec le temps de frottement sans marquer de ralentissement à l'inverse des métaux.

En outre, les matières plastiques sont transférées sur la surface métallique, dès le début du frottement, et malgré leur faible dureté, elles peuvent abraser cette surface métallique. Ces considérations laissent préjuger de la mauvaise qualité de ce matériau comme substitution coronaire occlusale.

IV - CONCLUSION

De l'étude précédente, on peut retenir essentiellement les éléments suivants :

- L'usure de deux corps en contact animés d'un mouvement relatif et soumis à des charges qui les rapprochent, dépend étroitement :

- . des caractéristiques mécaniques de ces corps
- . des conditions du frottement.

- Parmi les caractéristiques mécaniques, les plus intéressantes à retenir sont :

- . la dureté
- . le module de Young

Le critère d'OBERLE tient compte de ces deux caractéristiques dans sa relation :

$$\text{Modell Factor} = \frac{H}{E} = \frac{\text{dureté}}{\text{module } E}$$

Dans le cas de relations dynamiques de 2 corps entrant en contact, on tient compte de l'énergie potentielle emmagasinée ou "densité d'énergie ressort" (D.E.R.), qui est une constante caractéristique du matériau :

$$\text{D.E.R.} = \frac{P^2}{2E}$$

Le maximum d'énergie ressort susceptible d'être restituée est donné par :

$$I = k.V.D.E.R.$$

qui fait intervenir le volume et un facteur k , caractérisant la structure.

Cette notion d'énergie est intéressante pour évoquer l'énergie transmise par les structures dentaires ou postiches aux infrastructures (desmodonte et os alvéolaire), et dans le cas de reconstructions prothétiques.

- Quant au frottement, les éléments à prendre en considération sont :

- . la charge appliquée (la force de frottement est, en effet, proportionnelle à la charge)

- . et surtout les états de surface. Ceux-ci sont caractérisés par des défauts macro et micro-géométriques qui interviennent dans le processus de l'usure.

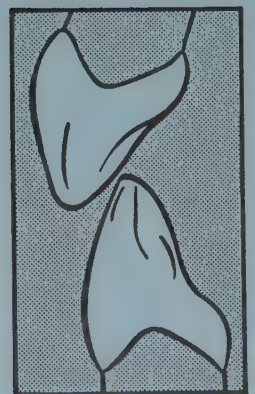
Au point de vue technologique, il faudra tenir compte des rugosités, du sens des rayures, de l'usinage et du polissage des pièces.

Les conséquences du frottement se manifestent au niveau des couches superficielles des matériaux par des déformations élastiques et plastiques, par la formation d'un bourrelet frontal, par des déplacements normaux à la surface, puis finalement par la coupe.

- Pour les métaux et les matières plastiques, la détérioration s'accompagne de transfert de matière, alors que pour les matériaux cassants non métalliques (émail, porcelaine) les endommagements se font par fêlures et fragmentations microscopiques produisant des mini particules qui deviennent des agents abrasifs.

CHAPITRE III.

LES ETUDES EXPERIMENTALES ANTERIEURES



En tant que praticien, et plus particulièrement de prothésiste, nous apportons au système dentaire, et par extension au système manducateur, des éléments hétérogènes qui doivent s'intégrer dans son mécanisme.

Pour réparer ces dommages créés par la carie dentaire, nous utilisons toute une gamme de produits d'obturation; s'ils sont insuffisants, il est alors fait appel aux techniques des inlays-onlays, coiffes périphériques de recouvrement, et bridges. Ces techniques utilisent divers matériaux métalliques et non métalliques, qui vont se substituer au recouvrement adamantin et entrer en contact avec l'émail des dents antagonistes, par l'intermédiaire des faces occlusales.

Il est donc intéressant et utile de connaître le comportement de ces couples, matériaux prothétiques faces à l'émail, parallèlement au couple émail-émail. C'est le but de cette étude expérimentale qui a été envisagée par quelques auteurs.

Ces études sont relatives à l'usure par friction directe ou attrition, et non pas relatives à l'usure par abrasion.

Les auteurs qui ont traités de ce problème sont par ordre chronologique :

NORMAN - 1964 (48)
 THOMSON - 1965 (68)
 MAHALICK, KNAP et WEITER - Janv. 1971 (42)
 TILLITSON, CRAIG et PEYTON - Fév. 1971 (69)
 MONASKY et TAYLOR - Mai 1971 (44)

MAHALICK et al (42) dans leur revue de la bibliographie, citent quelques travaux antérieurs : ceux relatifs à la dureté (Vickers, Brinell, Knopp) qui font état d'un frottement, mais dont les enseignements sont insuffisants quand on veut analyser l'usure "dynamique".

Ils citent les études de BODDICKER de 1947 qui utilise un articulateur actionné par un moteur. Les prothèses comportent des dents en porcelaine, en résine acrylique ou en or. L'appréciation de l'usure est donnée par les variations de la dimension verticale d'occlusion. Mais les résultats sont vagues, car l'usure dépend trop, en l'occurrence de l'arrangements des dents et des types de contacts.

SLACK 1949, se réfère à la machine à abraser de TABOR qui consiste en la rotation d'un disque en carbure de silicium sur lequel on applique les échantillons. Le calcul de l'usure se fait d'après la perte de poids. L'inconvénient de ce procédé est la nature du carbure de silice, bien plus abrasive que les matériaux dentaires pouvant frotter l'un sur l'autre.

OSBORNE 1949, a étudié l'usure des résines acryliques soumises à un jet de poussière de sable, ce qui n'a pas d'applications cliniques. Ce n'est qu'à partir de 1965 que des recherches ont été entreprises avec des appareillages simulant plus ou moins les conditions de la mastication.

Cependant en 1964, NORMAN ⁽⁴⁸⁾ a fait une étude fort intéressante sur les coefficients de frottement de divers couples de matériaux prothétiques, donnant de précieux renseignements sur la résistance à l'usure de ces matériaux.

Nous prendrons connaissance de ces travaux précédant les nôtres en suivant le plan suivant :

- Principes généraux d'expérimentation
- Appareillages
- Méthodes et évaluation de l'usure
- Résultats.

I - PRINCIPES GENERAUX D'EXPERIMENTATION

Comme cela a été défini dans le chapitre sur les généralités "Frottement, Usure", le frottement est la mise en contact entre deux corps, l'un appuyant sur l'autre, et animés d'un mouvement relatif. La répétition de ce mouvement relatif entre deux solides soumis à des charges entraîne l'usure des surfaces, c'est-à-dire, l'enlèvement non souhaité de matière (20-17).

L'usure dépend de nombreux paramètres dont certains ont été cités précédemment par l'HERMITE (29) :

- 1 - forme macroscopique des corps en contact
- 2 - l'état de surface des corps en contact
- 6 - nature et vitesse du mouvement relatif
- 3 - nature de la matière se trouvant à l'interface : air, liquide abrasif
- 4 - de la température, de l'humidité
- 5 - pression exercée entre les corps.

1) Forme macroscopique des échantillons

Les échantillons sont en général disposés de part et d'autre d'un plan horizontal : l'échantillon supérieur au-dessus de ce plan sera l'échantillon A ; l'échantillon inférieur au-dessous de ce plan sera l'échantillon B. Selon les auteurs, l'un des deux échantillons est fixe, alors que l'autre est solidaire d'un support mobile.

Pour NORMAN (48), les échantillons A sont taillés en forme de pointe de 1 mm de diamètre, les échantillons B ont des surfaces plates de 10 mm ou plus de diamètre.

Pour THOMSON (68), les échantillons A et B consistent dans le rapport en occlusion de relation centrée des dents postérieures en résine acrylique.

Pour MAHALICK (42), les échantillons se trouvent de part et d'autre d'un plan vertical, celui de gauche, échantillon B est mobile, celui de droite A est fixe.

A a une forme hémisphérique

B a une forme hémi-elliptique.

Pour TILLITSON ⁽⁶⁹⁾, l'échantillon supérieur A est un cône hémisphérique de 6,3 mm de diamètre et l'échantillon inférieur B est une surface plane.

Pour MONASKY ⁽⁴⁴⁾, l'échantillon A supérieur mobile est une surface plane de 1 cm² environ, l'échantillon B inférieur a aussi une surface plane de 1 cm².

2) Etat de surface des matériaux testés

L'état de surface joue un rôle important dans le processus frottement-usure; la présence de rugosités, le sens des rayures, les aspérités ont une influence sur le coefficient de frottement et sur les différents stades de l'usure, ainsi qu'il l'a été explicité dans le chapitre II concernant ces problèmes. Le contour des surfaces peut être déterminé par profilométrie, sections obliques, méthodes optiques interférentielles, diffraction électronique, méthode des répliques (COURTEL ⁽²⁰⁾).

Les auteurs précédents ont donnés parfois quelques précisions concernant des matériaux testés.

NORMAN a choisi les matériaux suivants :

- émail (provenant de dents extraites)
- porcelaine (cuite sous vide)
- résine acrylique (pour prothèse amovible)
- or type III ou IV
- alliage chrome - cobalt.

Le polissage est obtenu à l'aide d'une meulette caoutchouc de 7,6 cm de diamètre, en utilisant la face intérieure, jusqu'à disparition des rayures visibles. Pour lui, un polissage plus poussé peut faire réagir les matériaux de façon plus favorable, mais altère l'uniformité de l'expérimentation.

THOMSON utilise deux marques commerciales de dents en résine acrylique, telles qu'elles, et sans leur faire subir aucun polissage.

MAHALICK fait ses expériences sur les matériaux suivants :

- or : Ney.oro G3
- acryl : Namilton (polymérisation à chaud)
- porcelaine : échantillon A : Trubyte - Bioform
échantillon B : Ceramico cuite sur or Ceramico
- émail : origine non précisée.

La combinaison des couples se répartit en 3 groupes :

Groupe I	Groupe II	Groupe III
<u>A</u> / <u>B</u>	<u>A</u> / <u>B</u>	<u>A</u> / <u>B</u>
or / or	Acryl / Acryl	P / E
Acryl / or	P / Acryl	E / E
P / or	E / Acryl	P / P
E / or		

Tableau 2

L'état de surface n'est pas précisé, mais les échantillons étant obtenu d'après un moule en cuivre, l'état de polissage correspond à celui obtenu par un laboratoire de prothèse dentaire.

TILLITSON, GRAIG et PEYTON s'intéressent à :

- or : Oro B-2 de Ney
- porcelaine : Bioform , Dental Supply
- acryl-base : Lucitone de Caulk (polymérisation à chaud)
- émail : de boeuf
- chrome-nickel : Regalloy : Ranson-Randorf C^O.

Les échantillons supérieurs A hémisphériques sont obtenus, soit d'après un moule de plâtre pierre dentaire, soit par coupe au diamant de l'échantillon monté sur tour (Holdrige Radii Cutter).

Les échantillons inférieurs B plats sont polis au papier humidifié en carbure de silice au grain 600, qui efface les rugosités allant de 0,0076 mm à 0,0152 mm.

MONASKY a étudié les matériaux suivants :

- émail : provenant de la face vestibulaire de l'incisive supérieure
- or : type III de Jelenko
- P : ceramico vacuum fired porcelaine (cuite sous vide).

L'émail est rendu en surface plane par abrasion métallique sous courant d'eau, et le polissage final est obtenu par un oxyde d'aluminium ayant un grain de 1 μ .

Les alliages d'or sont aplanis de la même manière.

Les porcelaines P, sont cuites sous vide, sur dies Céramico. L'auteur s'est penché sur l'influence des états de surface, en particulier sur l'état de surface des porcelaines. Tous les échantillons de porcelaines sont d'abord aplanis avec un abrasif au carbure de silice à grain 240, puis ils sont classés en 4 groupes :

P 1 : porcelaine glacée au four

P 2 : porcelaine glacée au four, dont le glaçage a été détruit par un abrasif au grain

240

P 3 : porcelaine glacée au four, dont le glaçage a été détruit par un polissage au grain 400

P 4 : est la porcelaine précédente qui a été reglacée.

Les meilleurs états de surface sont pour P 4 puis P 1.

Les mauvais états de surface sont pour P 3 puis P 2.

3 et 4) Nature de la matière se trouvant à l'interface : humidité, température liquide, abrasif

Température, humidité

Le tableau IX d'ARCHARD et RABINOWICZ ⁽⁴⁾ (voir page 51) donne la variation du coefficient d'usure selon les conditions de glissement : soit sans ou avec lubrification : à l'air libre ou milieu liquide. Les variations sont relativement significatives quand il s'agit du frottement de deux métaux semblables; elles le sont moins quand il s'agit de 2 métaux différents, et presque nulles quand il s'agit de 2 corps métalliques.

Cependant, on peut signaler la présence d'un lubrifiant ou de matière dans les expériences des différents auteurs :

NORMAN : une goutte de salive à la température ambiante, provenant du même donneur a été utilisé pour chaque test.

THOMSON : bain d'eau à température ambiante.

MAHALICK : le champ de contact est nettoyé par un courant d'eau à la température ambiante.

TILLITSON, GRAIG et PEYTON : air ambiant, à sec et en milieu humide salivaire ou aqueux.

MONASKY : utilise une salive artificielle constituée par une solution à 1,5 % (par poids) et Dextran à haut poids moléculaire, + 2,5 % d'albumine d'oeuf, + eau pour 5 litres.

Pour reproduire l'action abrasive douce, supposée être celle existante dans la cavité buccale, on ajoute de la farine blanche à la solution précédente au taux de 1 gr./200 cc de salive artificielle.

Les 2 échantillons sont entièrement immergés durant le cycle complet des essais. La température est celle de la pièce.

5) Charges exercées sur les corps

D'après les lois d'AMONTONS et COULOMB, la force de frottement est proportionnelle à la charge située au-dessus de la surface de contact. Cependant, NORMAN s'est in-

intéressé, plus particulièrement, à la résistance au frottement ou coefficient de frottement, c'est-à-dire la force horizontale tangentielle nécessaire pour déplacer un corps :

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{\text{force horizontale}}{\text{force verticale}}$$

La force verticale est étalonnée de 0 à 25 grs avec des intervalles tous les 5 grs, soit 6 quotations. La force horizontale nécessaire à produire un déplacement est enregistrée pour chacune des valeurs 0, 5, 10, 15, 20, 25 grs.

THOMSON fait s'exercer entre les dents postérieures, des forces analogues aux conditions buccales pouvant produire une usure prononcée des dents en acryliques; ces forces sont obtenues par des charges verticales de 2, 25 kgs, 4, 53 kgs et 9, 06 kgs.

MAHALICK utilise des charges pouvant s'étalonner de 0 à 5,88 kgs.

TILLITSON, CRAIG et PEYTON comme NORMAN se sont intéressés aussi au coefficient de frottement

MONASKY utilise des poids pour obtenir une force constante verticale de 0,453 kgs au niveau du contact entre ces échantillons.

6) Nature et vitesse du mouvement relatif : production et durée du mouvement

Dans les expérimentations qui ont été faites antérieurement à celles des 5 auteurs cités ici, il n'a pas été tenu compte des mouvements physiologiques. C'est ainsi que les échantillons subissaient une pression, une vitesse, une durée, très éloignée des conditions buccales.

Depuis lors, il a été fait une tentative pour rester peu ou prou dans les limites physiologiques.

NORMAN ne se réfère pas aux mouvements mandibulaires puisque dans le frottement entre deux solides, il cherche à déterminer le coefficient de frottement.

Le mouvement a donc une direction horizontale parallèle au plan de contact; le contact se produit sur un vecteur de 8 mm et ne se fait qu'une fois dans le même sens.

THOMSON utilisant des dents postérieures en résine acrylique en rapport d'ORC (d'occlusion de relation centrée), soumises aux mouvements masticatoires, produit avec son appareillage un mouvement horizontal d'oscillation au rythme d'une oscillation par seconde.

Un système de came permet de rendre le contact intermittent. Cette oscillation et cette séparation du contact sont sensées simuler l'acte masticatoire.

Le mouvement est produit par un moteur électrique tournant à la vitesse de 60 r. p.m.

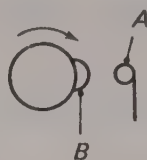
Les relevés de perte de hauteur sont faits toutes les 12 ou 24 heures. La durée de fonctionnement peut être illimitée, jusqu'à une usure complète des dents, mais THOMSON a laissé fonctionner son appareil à tester jusqu'à 288 heures.

MAHALICK donne les conditions suivantes pour que le fonctionnement d'un appareillage soit similaire à celui de la denture humaine :

- contact intermittent
- mouvement et contact selon mode elliptique
- contrôle de la force de contact
- vitesse dans la limite de la fonction masticatoire
- lavage du champ testé.

Le mouvement est produit par un moteur électrique à 48 r.p.m., muni d'un convertisseur pouvant abaissé cette vitesse.

L'échantillon B mobile, est fixé sur un anneau rotatif : ce système permet d'avoir un contact intermittent. La durée d'un test est de 485 minutes (environ 8 heures).



TILLITSON, CRAIG et PEYTON comme NORMAN s'intéressent plus précisément aux coefficients de frottement. Alors que NORMAN ne fait intervenir que les charges dans la variation du coefficient de frottement, TILLITSON et al. tiennent compte à la fois d'un mouvement longitudinal et transversal, des vitesses de déplacement et de la possibilité de repasser sur la même surface de frottement.

Ainsi la table de 15,2 x 45,70 cm de surface est animée par un système hydraulique d'un mouvement longitudinal à la vitesse de 0,76 à 45 m/minute sur une distance de 59,60 cm ; en direction transversale la distance est de 17,13 cm.

La vitesse peut être réglée jusqu'à 0,002 cm / seconde et le déplacement peut aller jusqu'aux limites inférieures de 5,09 mm en direction longitudinale et 1,58 mm en direction transversale.

La possibilité de pouvoir effectuer des essais répétés dans la même trace, permet d'étudier l'usure cumulée par interposition de particules.

MONASKY utilise un moteur électrique de 30 r.p.m. produisant un mouvement horizontal alternatif. Une came permet de séparer les échantillons et d'avoir ainsi des contacts de glissements intermittents. La durée d'un test s'étale sur 12 heures représentant 43.200 contacts. Pour la porcelaine, le test a été prolongé jusqu'à 24 heures avec relevés toutes les 3 heures.

II - APPAREILLAGES

En tenant compte de ces principes communs, les auteurs ont chacun construit des appareils plus ou moins complexes, qu'on peut diviser en 2 catégories :

a) les appareils construits pour étudier le coefficient de frottement pour lesquels on ne tient pas compte des conditions du mécanisme de la mastication

b) les appareils construits pour étudier l'usure consécutive au frottement, pour lesquels on tient compte, dans une certaine mesure, des conditions du mécanisme de mastication. Ces conditions sont définies de façon très large :

- contacts intermittents
- contrôle de la force
- contrôle de la vitesse
- lavage du champ.

Cependant, aucune indication chiffrée précise n'est fournie par les auteurs afin de pouvoir relier ces exigences physiologiques au fonctionnement de leurs appareils.

1) Pour la détermination du coefficient de frottement

La description de ces appareils étant du domaine de la mécanique, nous illustrerons simplement le type a) par le plan de l'agencement de NORMAN.

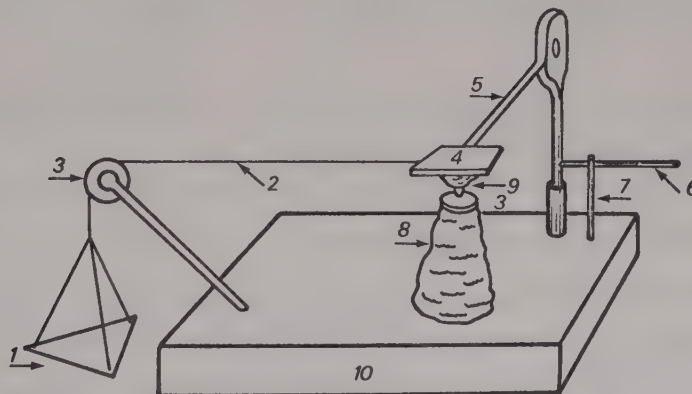


Figure 10

Un appareil à tester est utilisé pour déterminer la résistance au frottement de différents matériaux, employés pour les surfaces occlusales des restaurations :

- | | |
|--|---|
| 1 - Plateforme pour les poids créant les forces horizontales | 6 - Levier de contrôle |
| 2 - Fil de soie | 7 - Butée |
| 3 - Poulie | 8 - Plateforme supportant la surface à tester |
| 4 - Plateforme mobile pour l'application des forces verticales | 9 - La pointe flottante |
| 5 - Bras de support | 10 - Plateforme de base |

2) Pour la détermination de l'usure par frottement

Le plan de l'appareil de MONASKY est donné ci-dessous :

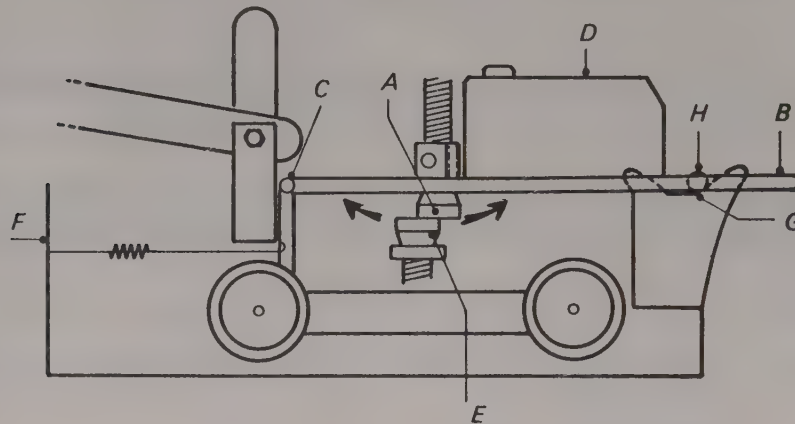


Figure 11

Vue schématique de profil de la machine à tester l'usure :

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| A - Echantillon | E - Support échantillon |
| B - Bras de support | F - Bac |
| C - Axe | G - Came |
| D - Poids | H - Excentrique |

III - METHODES D'EVALUATION DE L'USURE

Les procédés de mesure utilisés pour évaluer l'usure ont été la pesée (volume en cc^3 ou poids en grammes) ou par mesure de longueur.

1) THOMSON : mesures de longueur

THOMSON met en évidence l'usure des dents antagonistes en résine acrylique par des mesures de longueurs. La distance entre le bloc de dents supérieure et inférieure, est mesurée par des jauges (dial jauges); ces jauges enregistrent la diminution de hauteur verticale dans les 4 positions :

- d'occlusion de relation centrée
- de protrusion
- de latéralités droite et gauche.

2) MAHALICK : pesées, profilométrie, largeur de la trace d'usure, taux moyen de la perte totale de poids, moyenne de la perte totale de volume

Pesées : Les échantillons avant l'expérimentation sont pesés avec une balance de

précision; ils sont ensuite testés durant 485 minutes (environ 8 heures) puis repesés et la perte de poids est calculée.

Profilométrie: Un profilomètre a déterminé la topographie des surfaces des échantillons semielliptiques :

- or / or
- P / or
- P / P

La largeur de la trace d'usure: Elle est mesurée sur l'échantillon B. L'augmentation de la largeur indique une augmentation de l'usure.

Taux moyen de la perte totale de poids: La moyenne totale comprend l'usure des 2 échantillons A et B. Le pourcentage est égal à :

$$\% = \frac{\text{poids d'origine} \times 100}{\text{perte de poids}}$$

Moyenne de la perte totale de volume :

$$\text{la perte de volume} = \frac{\text{densité}}{\text{perte de poids}}$$

Par pyknométrie, on a obtenu auparavant la densité des divers échantillons, à savoir :

$$\begin{aligned} \text{or} &= 15,45 \text{ gm/cc} \\ \text{acryl} &= 1,15 \text{ gm/cc} \\ \text{P} &= 2,08 \text{ gr/cc} \\ \text{E} &= 2,5 \text{ gr/cc} \end{aligned}$$

La moyenne de la perte totale de volume est obtenue en additionnant les pertes moyennes des 2 échantillons A et B.

3) MONASKY : pesées, état de surface

MONASKY se réfère au procédé des pesées. Les échantillons A et B sont pesés séparément; les échantillons ont été testés de façon alternée, A prenant la place de B, et B de A. Il a été constaté de façon constante que l'échantillon supérieur mobile avait une perte de poids plus importante que l'échantillon inférieur fixe.

En plus de la perte de poids par usure, MONASKY a examiné l'état de surface. Cet examen était à la fois visuel, macroscopique et microscopique. Une microsonde électronique a été utilisée pour détecter le transfert de matériaux dans le couple or/P.

IV - RESULTATS1) Le coefficient de frottementa) par NORMAN

Il a noté des différences marquées entre les couples testés : émail, P , Acryl , Or , Cr-Co.

Si on prend le couple E/E comme référence, les couples se subdivisent en 2 groupes :

- couples ayant une résistance au frottement $\leq$ E/E

E / or	P / or	or / or	Cr-Co / Cr-Co
E / Cr-Co	P / Cr.Co	or / Cr.Co	

Tableau 3

- couples ayant une résistance au frottement $\geq$ E/E

P / P	Acryl / Acryl
P / E	Acryl / E
P / Acryl	Acryl / or
	Acryl / Cr-Co

Tableau 4

Le couple P/P offre la plus grande résistance au frottement.

Le couple Cr-Co/Cr-Co offre la plus petite résistance au frottement.

Le couple P/P a une résistance au frottement de 55 % de plus que le couple E/E.

Le couple P/or " " de 34 % de moins " E/E.

Le couple P/Cr-Co " " de 60 % " " E/E.

Le couple P/E a une résistance au frottement de 69 % " " P/P.

Le couple P/or " " de 77 % " " P/P.

Le couple Cr-Co/Cr-Co " " de 88 % " " P/P.

Ces pourcentages sont obtenus d'après les moyennes de combinaisons des semblables : exemple pointe P/surface acryl, puis pointe Acryl/surface P, pour chacun des poids (de 0 à 25 grs), puis on a effectué la moyenne générale.

NORMAN déduit que la force de frottement étant mesurable, on doit en tenir compte pour le choix des matériaux prothétiques. Les dents antagonistes en P ont une friction élevée. Les couples or/or et Cr.Co/Cr.Co ont un frottement inférieur à celui des dents naturelles.

Force Verticale		Force horizontale, aux points de contact				
	GM	Email	Porcelaine		Or	Alliage Chrome-Cobalt
		(GM)	(GM)	(GM)	(GM)	(GM)
Email	0	0,5	0,7	1,1	0	(1,2)
	5	2,1	2,8	3,3	1,4	0,9
	10	3,8	4,9	5,3	2,5	1,5
	15	5,2	6,9	7,7	4,4	2,4
	20	6,8	9,4	10,1	5,7	3,5
	25	8,9	12,0	12,9	7,0	4,6
Porcelaine	0	0,7	1,5	0,7	0	(2,9)
	5	2,5	3,7	2,0	1,7	0,4
	10	4,5	8,1	3,7	3,1	1,4
	15	6,8	12,7	6,1	4,9	2,4
	20	9,0	16,9	9,6	6,7	3,4
	25	10,9	20,1	11,4	7,8	4,7
Résine Acrylic	0	0,4	0,6	0,7	0,8	(0,1)
	5	2,1	2,9	3,5	3,0	1,5
	10	4,7	4,9	6,0	5,4	3,4
	15	7,4	6,8	8,6	7,2	5,1
	20	9,2	8,8	11,4	9,1	6,5
	25	11,4	10,4	14,9	10,4	8,1
Or	0	0,2	(1,3)	0,5	0,1	(1,8)
	5	1,2	0,8	2,4	1,3	0,7
	10	2,3	1,8	4,4	2,7	1,6
	15	3,6	2,9	6,3	4,2	2,7
	20	4,8	4,0	8,3	5,2	3,7
	25	6,0	5,0	10,2	6,3	5,1
Alliage Chrome-Cobalt	0	(0,4)	(2,1)	0,4	(1,7)	(6,7)
	5	0,9	0,7	2,3	0,7	—
	10	2,2	1,8	4,8	1,6	0,6
	15	3,7	2,8	7,2	2,9	1,0
	20	5,0	3,8	8,5	4,3	2,2
	25	6,9	4,7	10,8	5,5	3,3

Tableau 5 : Tableau de la résistance à la friction.

Du rapport entre $\frac{\text{force horizontale}}{\text{force verticale}}$ on tire les coefficients de frottement en fonction des charges.

Nous avons donné, dans le tableau ci-dessous, les résultats pour des charges de 25 grs.

	E	P	Acryl	Or	Cr.Co
E	0,35	0,48	0,51	0,28	0,18
P	0,43	0,80	0,45	0,31	0,18
Acryl	0,45	0,45	0,59	0,41	0,32
Or	0,24	0,20	0,40	0,25	0,20
Cr.Co	0,27	0,18	0,43	0,22	0,13

Tableau 6

Dans l'ordre croissant les résultats sont les suivants :

0,13	<u>Cr.Co/Cr.Co</u>	0,35	<u>E/E</u>
0,18	Cr.Co/E	0,40	Acryl/Or
0,18	Cr.Co/P	0,41	Or/Acryl
0,18	P/Cr.Co	0,43	Acryl/Cr.Co
0,20	Cr.Co/Or	0,43	E/P
0,20	P/Or	0,45	P/Acryl
0,22	Or/Cr.Co	0,45	E/Acryl
0,24	E/Or	0,45	Acryl/P
0,25	<u>Or/Or</u>	0,48	P/E
0,27	E/Cr.Co	0,51	Acryl/E
0,28	Or/E	0,59	<u>Acryl/Acryl</u>
0,31	Or/P	0,80	<u>P/P</u>
0,32	Cr.Co/Acryl		

Tableau 7

b) par TILLITSON, CRAIG et PEYTON

Ils ont recherché directement les coefficients de frottement entre les couples : Email bovin, P, Acryl, Or, Ni.Cr.. Dans l'étude précédente, les variations du coefficient de frottement n'ont été envisagées qu'en rapport avec la charge jusqu'à 25 grs.

Dans l'étude présente, en plus de la charge (de 100 à 1000 grs), il a été tenu compte de l'influence de la vitesse de glissement (de 0,02 à 3,75 cm/sec) et de la présence du nom d'un lubrifiant (air ambiant ou frottement à sec, et milieu aqueux ou salivaire).

Coefficient de frottement d'un échantillon hémisphérique d'email bovin sur divers matériaux		
Echantillon inférieur	Coefficient de frottement	
Or	0,12-0,20	
Amalgame	0,18-0,22	
Résine base	0,19-0,65	
Alliage Nickel-Chrome	0,10-0,12	
Porcelaine	0,10-0,12	0,50-0,90
Dentine de boeuf	0,35-0,40	0,45-0,55
Email de boeuf	0,22-0,60	0,50-0,60

Tableau 8

Le tableau 8 montre l'influence des lubrifiants. Pour l'or NiCr et l'Acryl l'humidité n'a pas d'effet; par contre le coefficient de frottement est plus élevé en milieu humide, qu'à sec pour les couples :

E/P - E/E - E/dentine

La vitesse ne semble pas avoir dans les conditions expérimentales d'influence sur le coefficient de frottement.

La charge croissante donne une augmentation du coefficient.

Les couples produisant des particules (E/Acryl) ont un coefficient augmenté.

Tests de frottement avec des frotteurs hémisphériques en alliages d'or				
Echantillon inférieur plat	Etat de l'interface	Vitesse (cm/sec)	Charge (gm)	Coefficient de frottement
Or	Propre et sec	0,16-0,30	100-1,000	0,2-0,6
Amalgame	Propre et sec	0,05-0,40	100-1,500	0,15-0,25
Porcelaine	Propre et sec	0,05-2,5	100-1,900	0,22-0,25
Porcelaine		0,23	100-1,900	0,16-0,17
Acrylic	Propre et sec	0,05-2,5	100-700	0,6-0,8
Acrylic	Propre et sec	0,05-2,7	100-700	0,5-0,6

Tableau 9

Tableau 9

Les essais ont été faits en repassant dans la première trace : le coefficient de frottement est le plus bas lors du premier passage et augmente lors du second passage du fait de la présence des particules. Si on arrête le test pour effectuer un lavage du champ, le coefficient redescend.

On note aussi que la présence d'eau dans le couple or/P diminue le coefficient de frottement.

Résistance à l'usure à sec estimée en perte de poids et de volume				
	Perte en poids et volume/1000 révolutions			
	gm		ml	
Alliage Nickel-Chrome	0,005	1	0,00067	1
Résine acrylique	0,030	6	0,0254	3,8
Résine base acrylic	0,030	6	0,0254	3,8
Porcelaine dentaire	0,033	6,5	0,013	1,9
Ciment Zinc-Phosphate	0,048	9,5	0,016	2,4
Amalgame dentaire	0,129	26,0	0,011	1,6

Tableau 10

Le tableau 10 donne la résistance à l'abrasion à sec estimée en poids et en volume, après avoir testé les matériaux contre une roue abrasive. Ces valeurs confirment l'intérêt de se référer à la perte de volume pour évaluer l'usure.

L'accroissement de la perte de volume est à l'inverse de l'ordre des duretés (sauf pour l'amalgame du fait du transfert de celui-ci sur la roue abrasive).

En conclusion, le coefficient de frottement d'un glisseur hémisphérique contre une surface plane dépend de la charge, de l'adhésion par transfert de matériaux, de la présence de particules abrasives, de la présence ou absence d'eau à l'interface.

A faibles charges, les matériaux ont tendance à se conduire comme des matériaux ductiles; et à charges élevées, à se conduire comme les matériaux cassants et fragiles; l'usure est donc plus rapide avec des charges élevées.

Si on se réfère au tableau 8, on peut classer les coefficients de frottement entre l'émail et les matériaux prothétiques, en milieu humide, de façon croissante :

0,10 - 0,12	E/Ni.Cr
0,12 - 0,20	E/Or
0,19 - 0,65	E/Acryl
0,50 - 0,60	E/E
0,50 - 0,90	E/P

Tableau 11

Ces valeurs ne sont pas superposables à celles trouvées par NORMAN ; cela est peut être dû au fait que dans un cas il s'agit d'émail bovin, et dans l'autre, d'émail humain. En outre, il ne s'agit pas des mêmes marques de matériaux dans les 2 cas.

Si l'on se réfère aux résultats de NORMAN pour les couples E/matériaux prothétiques, l'ordre croissant est :

0,24	E/Or
0,27	E/Cr.Co
0,35	E/E
0,45	E/Acryl

Tableau 12

Les coefficients les plus faibles pour TILLITSON sont ceux des couples E/Ni.Cr, E/or ; pour NORMAN E/or, E/Cr.Co.

Les coefficients les plus élevés sont pour TILLITSON E/P, pour NORMAN E/Acryl, E/P.

Les coefficients de frottement des Ni.Cr , Cr.Co et or sont très voisins et les plus faibles dans les 2 cas. De même, dans les 2 cas, le couple E/P ont les coefficients les plus élevés.

2) Le taux d'usure

a) par THOMSON

Il ne s'intéresse qu'à l'usure Acryl/Acryl. Le processus d'usure est représenté sur la figure 11 où l'on constate un ralentissement de l'usure au fur et à mesure de la création de grandes surfaces de contact entre les faces occlusales antagonistes. A ce stade même des charges de 9,06 kg donnent une usure relativement légère.

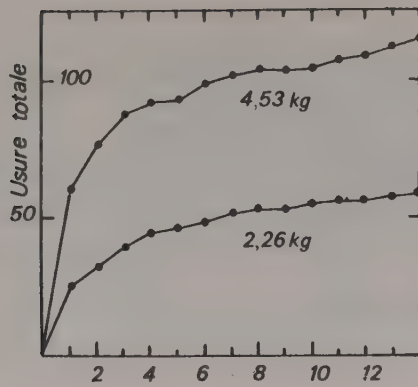


Figure 11

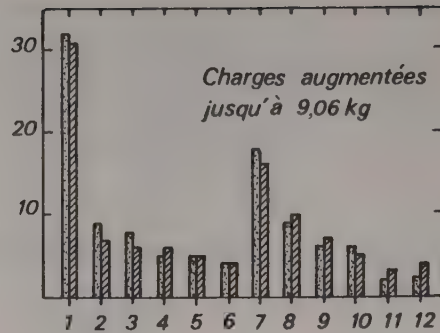


Figure 12

Enregistrements des tests d'usure de dents acryliques sous des charges de 2,26 kg et 4,53 kg.

La figure 12 montre l'usure enregistrée pour 2 marques différentes de résine acrylique. La perte de dimension verticale enregistrée après un essai de 144 heures sous 4,53 kg, suivi de 144 heures sous 9,06 kg, donne les résultats suivants pour les 4 positions, en mm :

	Echant. A	Echant. B
ORC	0,43179	0,43179
Latérale G	0,83818	0,71118
Latérale D	0,71118	0,78738
Protrusion	0,71118	0,71118

Tableau 13

Il n'y a pas de différences significatives entre ces 2 marques d'Acryl, dont l'une pourtant, avait été déclarée supérieure à la résistance à l'abrasion.

THOMSON fait remarquer que les charges et la durée d'application, utilisées au laboratoire sont élevées et ne sont pas physiologiques. Ainsi, pour obtenir une usure équivalente, observée sur la prothèse totale d'un patient ayant des habitudes de grincement non fonctionnel, utilisant sa prothèse 2 ans, il faut au laboratoire réunir les conditions suivantes :

charges : 4,53 kg - 9,06 kg

durée du test : 288 heures

mouvement de 15 mm à la cadence de 60/minute et contact permanent des faces occlusales.

YURKSTAS ⁽⁷²⁾ a calculé que les forces moyennes de mastication d'un porteur de prothèse totale, est de 0,270 à 1,81 kg et SHEPPARD et MARKUS ⁽⁶³⁾ ont signalé que la durée des contacts dentaires pendant la mastication n'exède pas 11,7 minutes/jour.

b) par MAHALICK

Il envisage l'usure de l'émail, P, Acryl, or.

Largeur moyenne de la trace d'usure et profilométrie (mm).

Les résultats donnés par largeur de trace sont expérimentés par (voir la figure) :

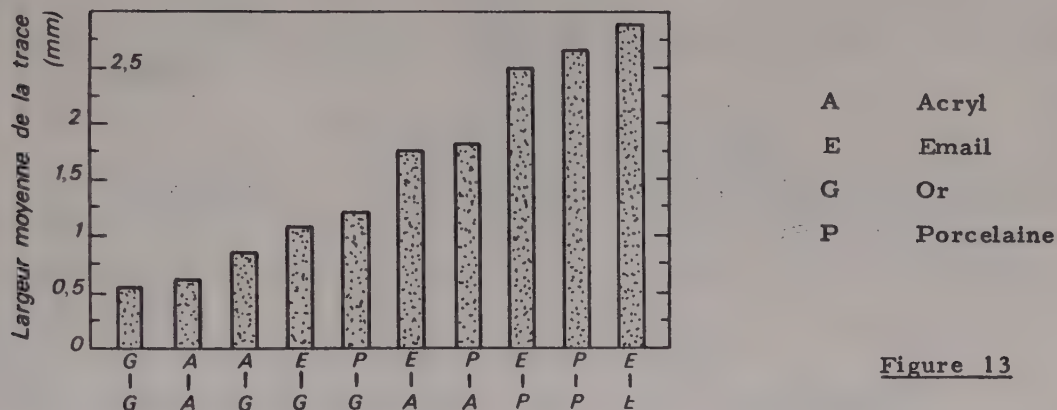


Figure 13

La largeur la plus faible en ordre croissant pour les couples or/or, Acryl/Acryl, Acryl/or.

La largeur la plus élevée en ordre décroissant pour les couples E/E, P/P, E/P.

Taux moyen de la perte totale de poids.

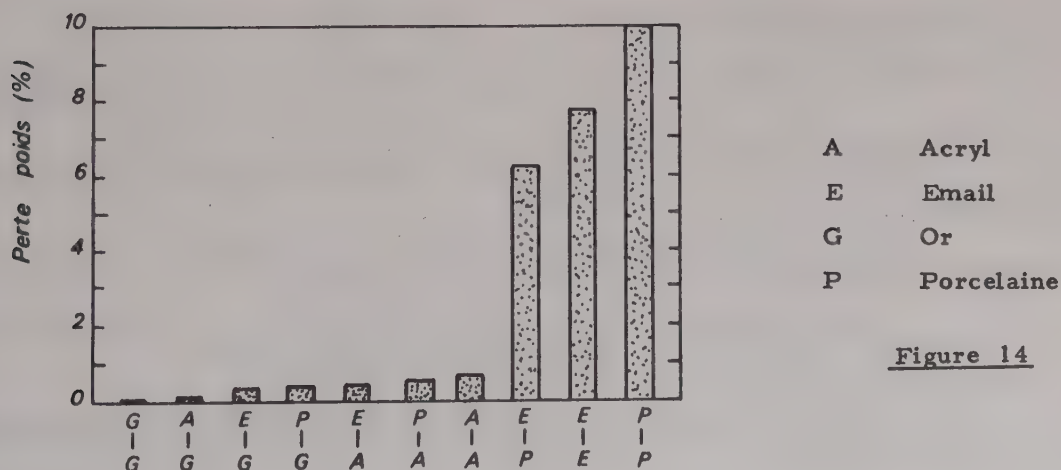


Figure 14

Les pourcentages les plus faibles dans l'ordre décroissant sont les couples or/or , Acryl/or , E/or.

Les pourcentages les plus élevés dans l'ordre décroissant sont les couples P/P , E/E , E/P.

Moyennes de la perte totale de volume ($\text{cc} \times 10^{-6}$).

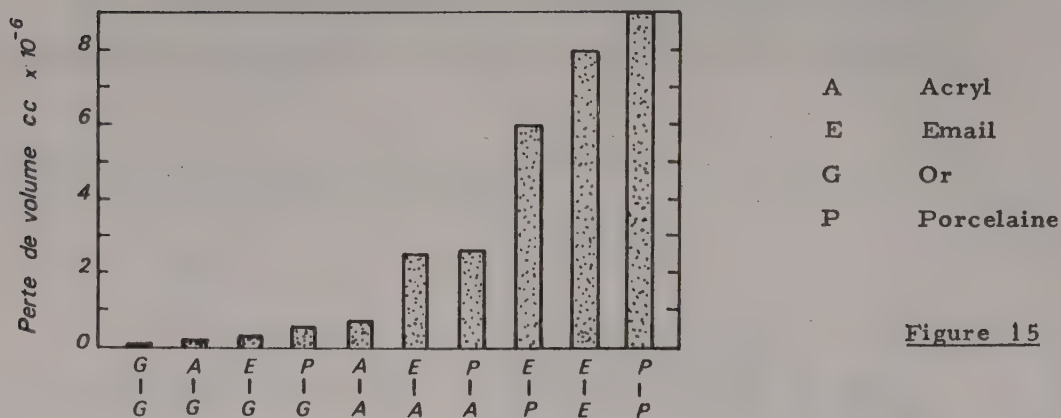


Figure 15

Les plus faibles pertes en ordre croissant sont pour les couples or/or, Acryl/or , E/or.

Les pertes les plus élevées dans l'ordre décroissant sont pour les couples P/P , E/E , E/P.

Pour MAHALICK, c'est l'usure totale du couple qui est plus significative que l'usure de chacun des éléments du couple. En effet, cliniquement la perte totale de volume peut avoir une conséquence pathologique.

En conclusion, il note donc :

- que le couple P/P subit une usure sévère et doit être évité en prothèse conjointe
- que le couple or/or offrant la plus grande résistance à l'usure, est indiqué dans tous les cas de prothèse
- que les couples Acryl/P et Acryl/E du fait de l'usure importante, sont à éviter
- que le couple E/P < E/E donne une grande abrasion

Les couples P/E , P/or > or/E , or/or. La porcelaine est donc contre-indiquée pour les faces occlusales.

Les taux d'usure des groupes I, II et III sont les suivants :

Groupe I < Groupe II < Groupe III ; et le meilleur couple est l'or/or.

c) par MONASKY

Il a testé l'émail (face vestibulaire de l'incisive supérieure), l'or, 4 porcelaines ayant des états de surface différents :

P1 = Porcelaine glacée

P2 = Porcelaine glacée et glaçage détruit par grain au 240

P3 = Porcelaine glacée et glaçage détruit par grain au 400 (ou porcelaine polie)

P4 = Porcelaine glacée et glaçage détruit par grain au 400 et reglacée.

- Perte de poids

Les pesées ont été faites avant et après les test. Les échantillons montés, ont été nettoyés et séchés avant les pesées, dans un bain d'air à 93° durant une période suffisante à produire un poids constant (étude précédente). La perte moyenne pour chaque élément du couple est reportée dans le tableau suivant ; dans la colonne de droite est reportée la perte moyenne totale de poids. (voir tableau 14, page 58).

Le tableau ci-dessous donne un classement des couples allant de celui qui s'use la plus, au couple qui s'use le moins (usure totale du couple).

5,50	E/P2	2,55	or/P1
4,82	E/E	2,21	or/P3
4,69	E/P1	1,54	or/or
4,21	E/P3	0,96	P1/P1
3,83	or/P2	0,92	P1/P2
2,83	E/P4	0,80	P1/P3
2,79	E/or		

Tableau 15

Le couple le plus "usant" est l'émail contre la porcelaine dont le glaçage a été détruit par un meulage au grain 240 (polissage insuffisant).

Le couple le moins "usant" est la porcelaine glacée contre la porcelaine au glaçage détruit mais repoli avec un grain fin de 400. Le couple suivant est la porcelaine repolie au grain 240 ; ensuite, la porcelaine glacée contre la porcelaine glacée.

Echantillons	Perte moyenne de poids (mg)	Marge d'erreur + -	Perte moyenne totale de poids
E/P4	2,18 0,65	2,65 0,22	2,83
E/or	2,38 0,41	1,37 0,42	2,79
E/E	2,41 2,41	2,05 2,05	4,82
E/P3	3,73 0,48	2,41 0,16	4,21
E/P1	3,87 0,82	2,00 0,09	4,69
E/P2	4,77 0,73	2,54 0,13	5,50
or/or	0,77 0,77	0,38 0,38	1,54
or/P3	1,56 0,65	0,73 0,09	2,21
or/P1	2,49 0,06	1,50 0,08	2,55
or/P2	3,64 0,19	2,52 0,16	3,83
P1/P2	0,28 0,64	0,23 0,20	0,92
P1/P3	0,35 0,45	0,26 0,21	0,80
P1/P1	0,48 0,48	0,23 0,23	0,96

Tableau 14

On remarquera sur ce tableau, une grande variation de la marge d'erreur qui est due au procédé de séchage pour obtenir un poids constant (ce procédé a dû être utilisé pour éliminer l'eau absorbée par la résine époxy qui enrobe les échantillons).

Si on classe ces couples par catégories de matériaux, les résultats sont les suivants :

<u>E</u>		<u>or</u>		<u>P</u>	
E/P2	6,50	or/P2	3,83	P1/P1	0,96
E/E	4,82	or/P1	2,55	P1/P2	0,92
E/P1	4,69	or/P3	2,21	P1/P3	0,80
E/P3	4,21	or/or	1,54		
E/P4	2,83				
E/or	2,79				

Tableau 16

Face à l'émail, le "meilleur" matériau est l'or, le plus "mauvais" est la porcelaine au glaçage détruit par grain 240.

Face à l'or, le "meilleur" matériaux est l'or, le plus "mauvais" est la porcelaine au glaçage détruit par meulage au grain 240.

Face à la porcelaine glacée, la porcelaine glacée est légèrement plus "usant" qu'une porcelaine au glaçage détruit, mais repolie au grain fin 400.

- Examens complémentaires : visuels, microscopique, microsonde électronique.

Dans le couple E/or, on observe sur les surfaces de l'un et l'autre matériau, la présence de rainures et de rayures. Leur étendue est fonction de l'état de rugosité des surfaces antagonistes.

Dans le couple P (1234)/E et P/P on a observé dans tous les cas, un polissage au bout de 12 heures.

Dans le couple P/or, il n'y a qu'un polissage minime au bout de 12 heures. La P2 donne une abrasion élevée de la surface or. De plus, visuellement, on a constaté un transfert d'or sur la porcelaine, cela a été confirmé par la microsonde électronique.

La figure 15 montre un test d'usure mené durant 24 heures pour un couple E/P2 ; le nombre de contacts est de 86 400 ; et le test a été interrompu à 3, 6, 12 et 24 heures pour les relevés.

On constate une réduction significative du taux d'usure de la porcelaine après 3 heures, et une réduction plus légère de l'usure de l'émail.

L'observation visuelle permet de se rendre compte de l'apparition progressive d'un poli de surface. Après 24 heures, les surfaces de porcelaines sont complètement polies.

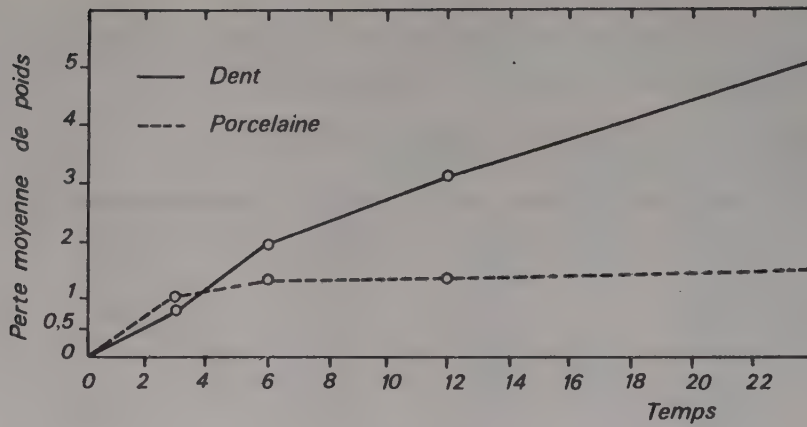


Figure 15

Perte de poids en fonction du temps pour la dent et pour la porcelaine.

- Conclusions

En conclusions, le glaçage des surfaces rugueuses des porcelaines, permettent de réduire le taux d'usure. Le polissage permet de réduire l'usure à un niveau équivalent de celui des structures dentaires.

La porcelaine rugueuse tend à se polir avec le temps, mais entraîne, avant le polissage, une usure élevée de l'émail.

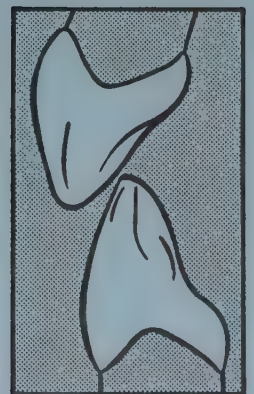
Au point de vue clinique, on peut déduire que le glaçage de la porcelaine, à lui seul, n'est pas suffisant pour diminuer le taux d'usure : il faut effectuer un polissage "fin" et glacer ensuite.

Si des meulages correctifs doivent être effectués, il faut les faire suivre par un polissage avec un grain aussi fin que possible, pour diminuer les rugosités qui provoquent les taux d'usure initiaux élevés.

Il est préférable d'effectuer les corrections avant l'insertion, de plus polir finement, puis de reglaser; en effet, le module de rupture est nettement plus élevé pour une porcelaine glacée que pour une porcelaine non glacée; et la porcelaine glacée est ainsi plus apte à résister aux forces d'impact et aux contraintes occlusales.

CHAPITRE IV.

LES ETUDES EXPERIMENTALES PERSONNELLES



A ~ Matériel et méthode



I - LES MATERIAUX SELECTIONNES

Outre l'émail, les matériaux prothétiques utilisés comprennent les groupes suivants :

- les alliages d'or
- les porcelaines dentaires
- les alliages chrome-cobalt et nickel-chrome
- les résines acryliques.

Comme nous l'avons vu dans la première partie, le comportement de ces matériaux face à l'usure, dépend de leurs caractéristiques mécaniques, notamment de la limite élastique, de la dureté, du module de Young, et aussi de leur composition. Les caractéristiques mécaniques et la composition de ces grands groupes sont donnés en annexe.

Les matériaux choisis peuvent être divisés en deux groupes :

1) les alliages, qui servent à tous les besoins de la prothèse conjointe

- couronne coulée
- CIV (coiffe à incrustation vestibulaire résine de RIVAULT (58))
- reverse-pin (ou coiffe à incrustation vestibulaire céramique)
- couronne CM (céramo-métallique)
- ponts.

2) les éléments cosmétiques, qui ont pour but de cacher dans un but esthétique, la présence du métal (ce sont les résines acryliques, les porcelaines) ou qui peuvent se substituer entièrement au métal telles les couronnes Jackets "résine" ou porcelaine alumineuse.

Dans les restaurations étendues et les "réhabilitations" occlusales, les canines participent à la fonction, soit par l'intermédiaire de leur émail naturel, soit par l'intermédiaire d'un matériau d'apport. Les possibilités de couple antagonistes au niveau canin, peuvent être :

alliage / alliage
alliage / cosmétique
cosmétique / alliage
cosmétique / cosmétique

Dans certains cas, par le fait d'un grand délabrement dentaire, il peut arriver que les canines naturelles absentes, soient remplacées par des éléments participant à une prothèse amovible. Dans ces cas, on utilise généralement des dents cosmétiques préfabriquées en résine ou en porcelaine.

1) Les alliages

Les plus généralement utilisés, et depuis très longtemps, sont les alliages d'or. Depuis la dernière guerre, en raison de la pénurie d'or, les aciers 18/8 ont fait leur apparition, sans pouvoir rivaliser avec les alliages d'or. Les progrès de la métallurgie et de la technologie, ont permis depuis assez peu de temps, d'utiliser de plus en plus les alliages Cr Co et Ni Cr. Nous avons retenu un alliage d'or de DURAND GIRARD, et deux alliages Ni Cr ⁽¹⁹⁾ le Chromanit H et le Ticon.

a) Alliages d'or : DG3 à couler (Durand Girard) qui a les propriétés mécaniques suivantes ⁽¹⁴⁾:

	Densité g/cm ³	Dureté vickers	Limite d'élasticité Kg/mm ²	Charge de rupture Kg/mm ²	Allongement %	Point de fusion
Recuit	15,1	161	52	65	2,7	960°
Traité	15,1	271	93	104	1,3	960°

Tableau 17

b) Alliage NiCr

- Chromanit H

Composition (Laboratoire National d'Essais).

%	Ni	Cr	Fe	Si	Mg	C	Cu	Co	S
%	68	23,1	4,4	2,01	0,77	0,09	0,01	0,05	0,04

Propriétés mécaniques d'après BUNISSET ⁽¹⁵⁾ selon le type de coulée :

	Limite élastique Kg/mm ²	Module E Kg/mm ²	Dureté HVN (50 grs)
Par induction	30	16 000	325
Au chalumeau	38	16 000	290

Tableau 18

D'après le fabricant :

Densité g/cm ³	Dureté Vickers	Module E	Charge de rupture	Allon- gement	Point de fusion
7,5	210 en surface 205 à coeur	16 500	78	5	1290° à 1340°

Tableau 19

- Ticon

Composition (BUNISSET ⁽¹⁵⁾).

	Ni	Cr	Fe	Si	Mg	C	Mo	Al	Be
%	70	16	0,4	0,8	4	0,02	4,9	2,6	0,5

Propriétés mécaniques d'après BUNISSET et le type de coulée.

	Limite élastique Kg/mm ²	Module E Kg/mm ²	Dureté HVN (50 grs)
Par induction	56	16 000	390
Par chalumeau	non mesurable rupture prématurée	16 000	400

Tableau 20

D'après le fabricant :

Charge de rupture	Limite élastique	Module E	Dureté HBN	Allongement
98,43	63,28	21 100	220 - 240	7 à la coulée 14 après cuisson de la porcelaine

Tableau 21

Ces deux alliages sont très voisins des NiCr industriels : le Ni constitue près des $\frac{2}{3}$ (65 à 70 %) et les Cr le $\frac{1}{3}$ de l'alliage (15 à 25 %). Les autres éléments modifient les propriétés mécaniques, facilitent la coulabilité et l'usinabilité ou améliorent la jonction avec la céramique.

2) Les cosmétiques

a) les résines

La marque commerciale utilisée a été celle d'"IVOCLAR" pour les dents préfabriquées résine SR Vivodent (cross-linked), aussi bien que la résine dentine pour couronne et bridge.

Il ne nous a pas été possible d'obtenir la composition et les propriétés mécaniques. Il semble que celles-ci manquent de stabilité et sont soumises à des variables qui dépendent de la technique utilisée, de la manipulation et de l'environnement. Les valeurs moyennes sont d'après SKINNER ⁽⁶⁵⁾, pour les acryls à chaud :

Résistance à la traction	:	6 Kg / mm ²
Mod. E	:	240 Kg / mm ²
Dureté Knoop	:	18 - 20
Résistance à l'impact Charpy	:	0,1 à 0,3 Kg / mm ²

Tableau 22

D'autre part, les travaux de THOMSON ⁽⁶⁸⁾ ont montré que la résistance à l'usure n'était pas en accord avec les propriétés mécaniques d'une marque donnée comme supérieure par rapport à l'autre.

b) Les porcelaines

La marque commerciale utilisée, a été celle-ci : VITA.

Le fabricant n'a pas fourni les renseignements demandés, à part une référence aux travaux de MAC LEAN et HUGHES ⁽⁴¹⁾ qui précisent :

	VITADUR	Porcelaine dentaire traditionnelle
Résistance à la traction	1210 Kg / cm ²	352 Kg / cm ²
Résistance à la pression	22218 Kg / cm ²	3515 Kg / cm ²

Tableau 23

HARTER ⁽²⁶⁾ a cherché à déterminer le module E des céramo-alumines, servant à la fabrication des couronnes-Jackets, les résultats sont :

- pour la céramo-alumine de Trey : 4848 à 8712 Kg / mm²
- pour la céramo-alumine de Vitadur : 5367 à 9226 Kg / mm².

Ces variations étant dues au processus artisanal de la fabrication des éprouvettes, à la dessiccation avec un vibreur à la cuisson, et au choix de la céramique (dentine, émail, noyau).

POGGIOLI ⁽⁵³⁾ dans son étude expérimentale sur les céramo-métalliques opaques (Stern, Céramico, Vita, Biodent, Thermocraft) trouve les résultats suivants :

- résistance à la flexion entre 5,62 et 4,12 Kg / mm²
- module E entre 7613 et 6513 Kg / mm²

Ci-dessous son diagramme comparant les modules E des alliages d'or, des alliages au chrome, et de la céramique.

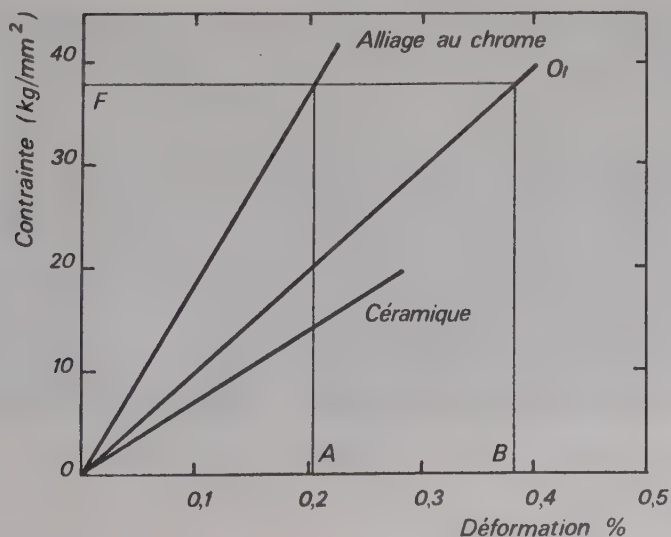


Figure 16

II - METHODE EXPERIMENTALE

La méthode expérimentale consiste en l'utilisation d'un appareillage produisant des contacts de glissements intermittents entre les échantillons immergés dans de la salive naturelle. Les échantillons utilisés sont :

- un alliage d'or, type III DG3
- deux alliages nickel-chrome : chromanit H et ticon
- un alliage résine acrylique Ivoclar (méthyl méthacrylate)
- une porcelaine Vita
- et de l'émail dentaire humain provenant de dents anciennement extraites et

conservées dans le formol.

Pour enregistrer les variations du comportement de ces matériaux, il a été tenu compte essentiellement :

- de l'état de surface
- de la microdureté

et l'usure a été mise en évidence par des mesures de longueur.

1) Préparation des échantillons

a) L'enrobage

Comme la plupart des auteurs cités précédemment, les échantillons sont situés de part et d'autre d'un plan horizontal, l'un étant fixé, en l'occurrence l'échantillon inférieur, l'autre étant mobile ou échantillon supérieur.

- L'échantillon fixe : Il a eu au départ, une surface plus ou moins plane, de forme quelconque de 3 x 10 mm au minimum.

- L'échantillon mobile : Il est façonné, préalablement de manière à obtenir une section droite rectangulaire, d'une largeur de 1 à 2 mm, d'une longueur de 3 à 4 mm. Cette forme prismatique permet de conserver une surface de contact constante, malgré l'usure due aux frottements.

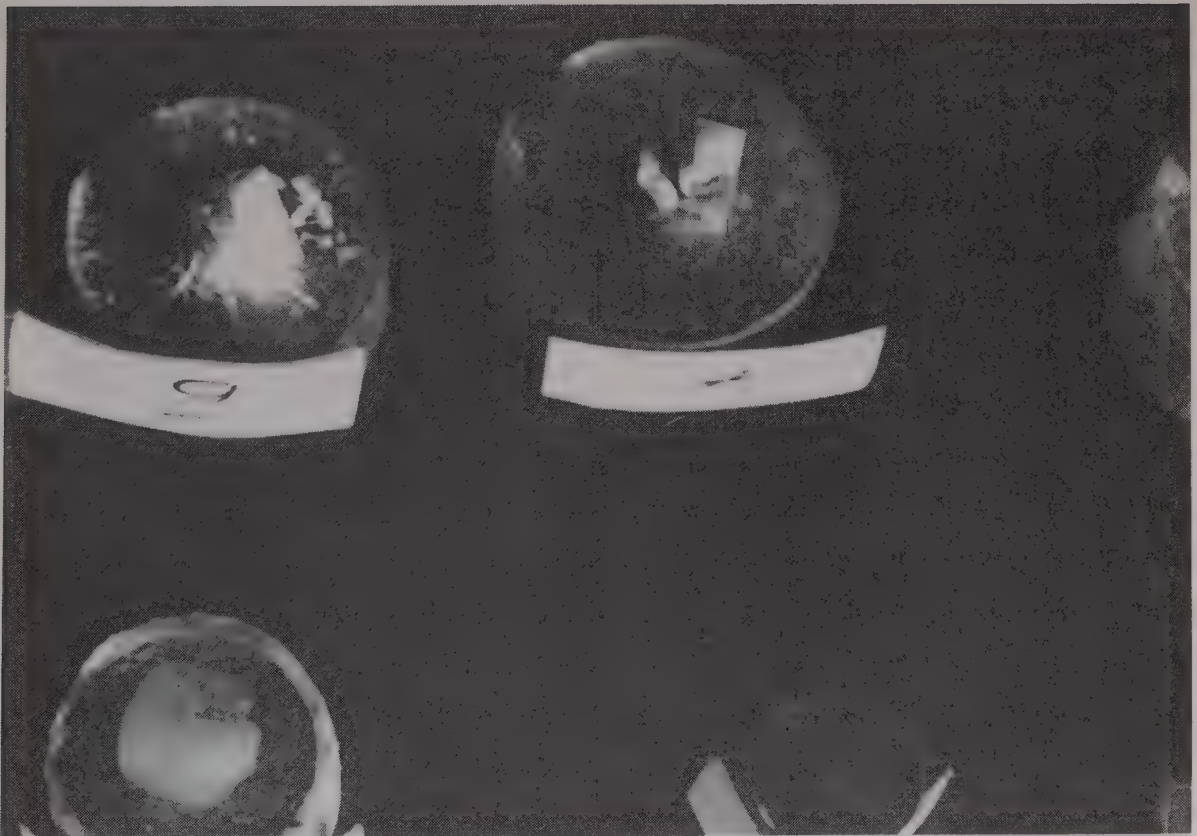
Ces échantillons sont enrobés dans de la résine époxy. Un tube cylindrique en polyéthylène posé sur une surface parfaitement plane, a servi provisoirement de moule pour contenir la résine époxy.

b) Le polissage

Après démoulage, les échantillons qui sont parfois recouverts de résine époxy, sont soumis à un polissage mécanique au papier abrasif utilisé en métallographie. Les dernières passes sont effectuées au papier n° 600.



Echantillons moulés dans la résine époxy.



c) Le parallélisme

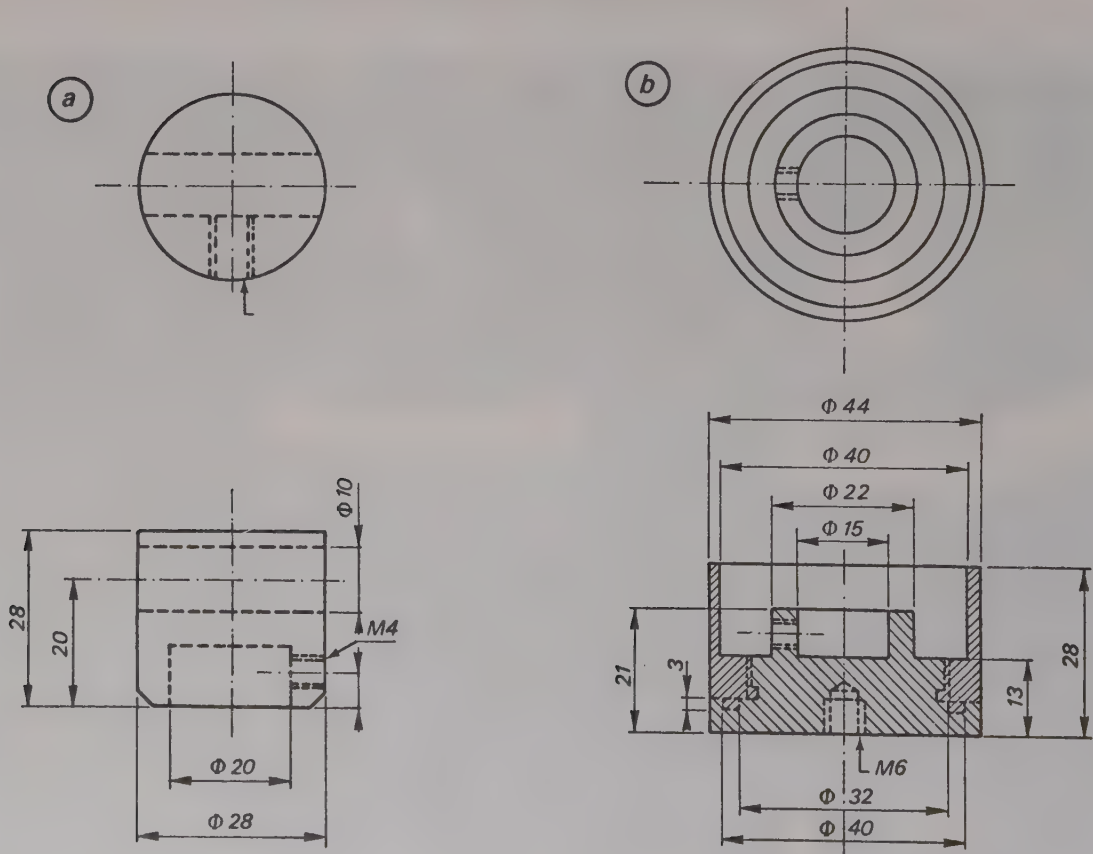
Avant l'insertion des échantillons enrobés de résine époxy, dans des godets porte-échantillons, il faut s'assurer du parallélisme entre cette surface polie et la base du cylindre en époxy. Ce contrôle est assuré visuellement par un pied à coulisse au 1/100, dont la branche inférieure suit la base du cylindre et la branche supérieure suit la surface polie.

Le parallélisme des échantillons supérieur et inférieur ainsi contrôlés, permettra d'assurer entre eux un contact complet lors de la mise en route du système de frottement.

Les surfaces de références définies, serviront à bien positionner les échantillons sur leur support, et permettront d'effectuer des relevés d'usure par arrêt momentané de l'essai.

d) les porte-échantillons

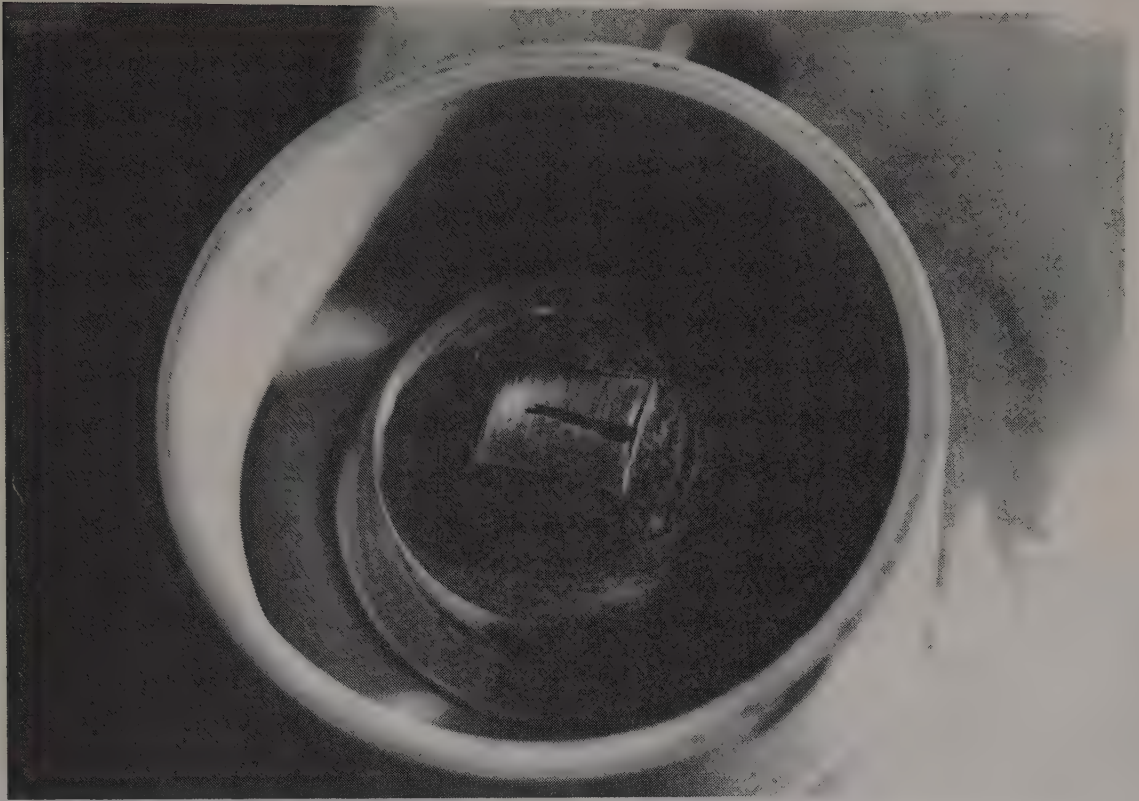
L'échantillon supérieur appelé frotteur qui sera animé d'un mouvement alternatif est fixé dans un support cylindrique en aluminium à fond plat. Une vis latérale permet de garder l'échantillon en place durant l'essai, aussi bien que de permettre de le libérer en cours ou en fin de test, pour pouvoir procéder aux mesures et au contrôle sous le microscope (fig. 17 b).



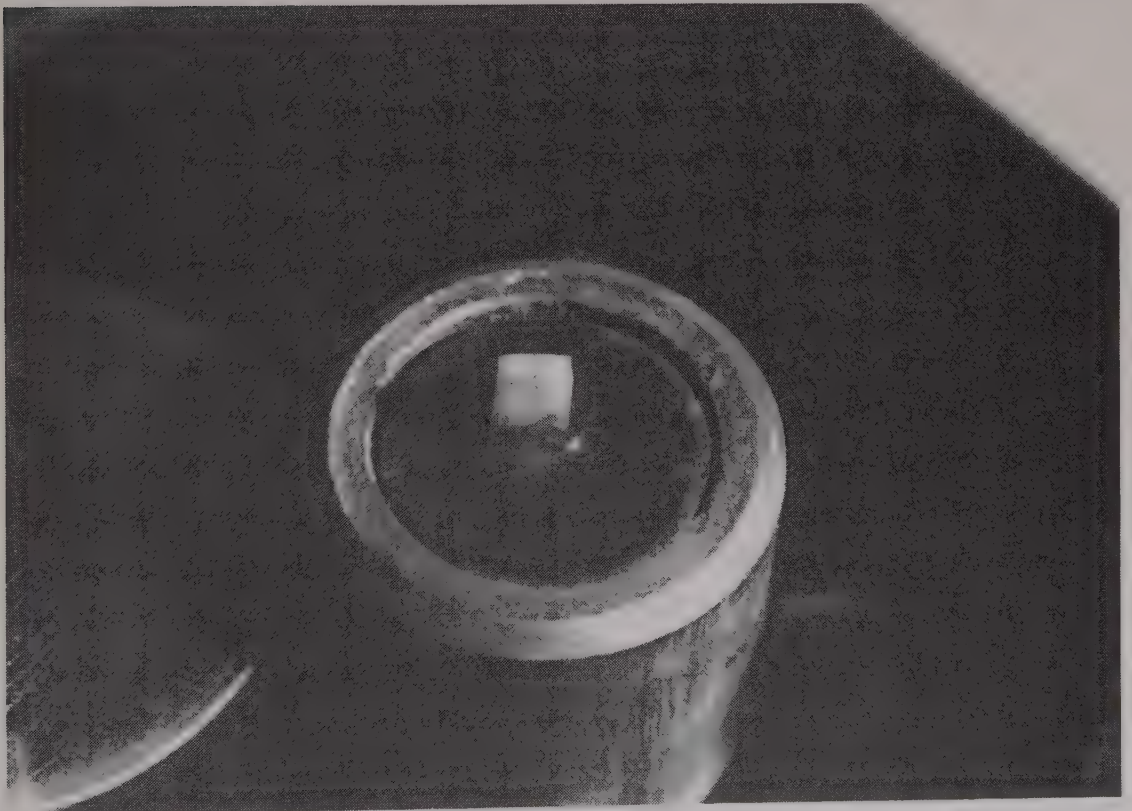
Porte-échantillon supérieur

Porte-échantillon inférieur

Figure 17



Vue du porte-échantillon inférieur contenant la salive .



Vue du port-échantillon supérieur.

L'échantillon inférieur fixe, est maintenu lui aussi dans un support cylindrique, à fond plat. Ce support est serti d'un godet de telle façon qu'il soit possible d'ajouter un lubrifiant immergeant complètement l'échantillon (fig. 17 a).

Les porte-échantillons peuvent être positionnés en translation et rotation, dans le plan horizontal, afin d'assurer le frottement sur une partie bien définie, et afin d'obtenir le parallélisme des surfaces en regard. Le porte-échantillon inférieur peut être éventuellement surélevé, pour obtenir le contact avec l'échantillon supérieur.

2) Les relevés de l'état de surface : le Talysurf

En métrologie, les états de surface sont enregistrés par un appareil composé d'un palpeur à pointe fine qui suit le profil des irrégularités de surface. L'enregistrement fournit :

- un graphique du profil qui représente une section droite des irrégularités de la surface étudiée
- l'intégrateur R_a incorporé travaille sur des longueurs de base sélectionnées (ou cutt. offs). L'évaluation des CLA (Center Line Average) * sert de base au contrôle de qualité de la surface.

Sur les photos (cf. p. 71) le Talysurf comprend :

- un marbre à colonne
- une boîte de vitesse
- un pick-up
- un bloc électronique renfermant l'intégrateur
- un enregistreur rectiligne équipé d'une plume et d'un rouleau de papier.

L'enregistreur délivre des graphiques à coordonnées rectilignes. Le déplacement de la plume comporte un zéro central. Le graphique est relevé à une vitesse de 305 mm/mn pour des appareils fonctionnant sur la fréquence de 50 Hz, de 365 mm/mn sur fréquence de 60 Hz, amplifications en abscisses x 20 et x 100.

Les graphiques reproduits ici (figure 18) représentent :

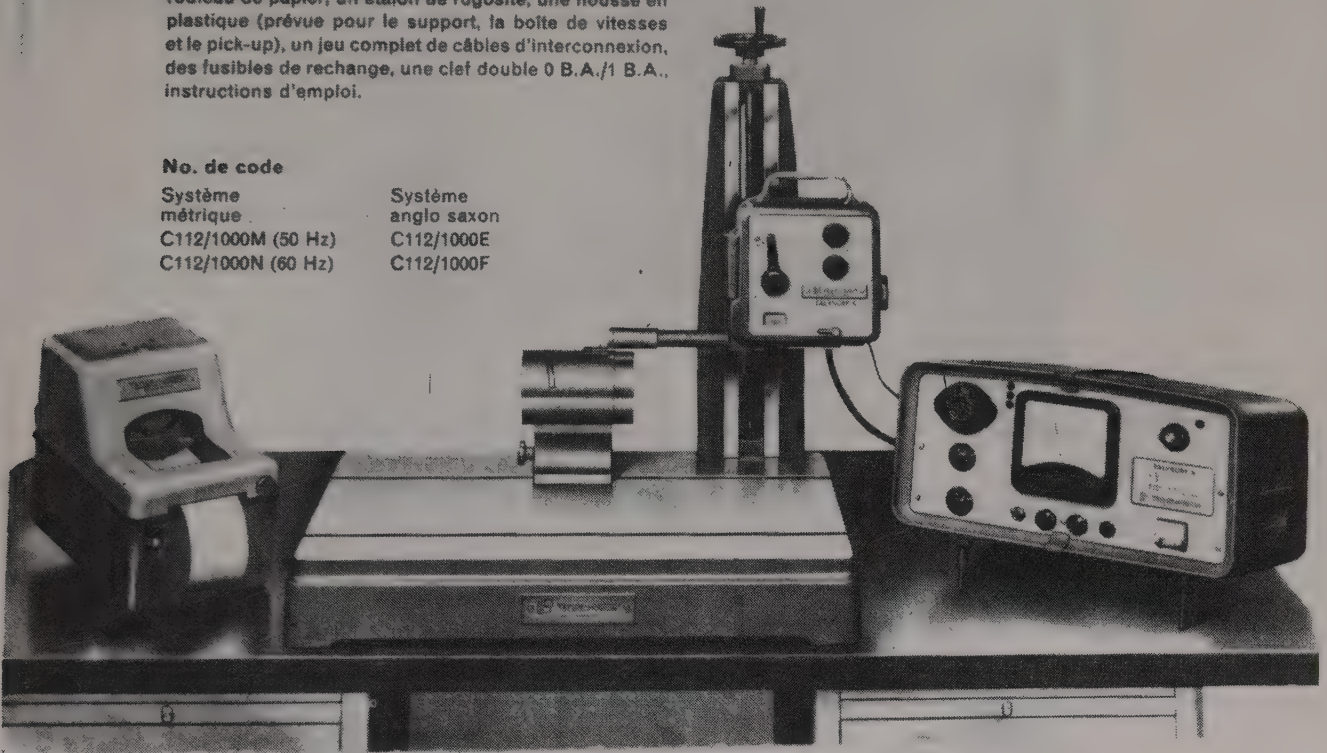
- graphique du haut et du milieu : course du palpeur sur les stries de l'é-talon de rugosité
- graphique du bas : la reproduction des irrégularités sur le profil d'une éprouvette cylindrique en acier ayant subi une rectification de qualité moyenne.

* Ligne moyenne centrale

"TALYSURF 4" - Appareil à mesurer les états de surface. L'appareil complet comprend: un marbre à colonne avec Vê, une boîte de vitesses, un pick-up standard, un bloc électronique renfermant l'intégrateur, un enregistreur rectiligne équipé d'une plume et d'un rouleau de papier, un étalon de rugosité, une housse en plastique (prévue pour le support, la boîte de vitesses et le pick-up), un jeu complet de câbles d'interconnexion, des fusibles de rechange, une clef double 0 B.A./1 B.A., instructions d'emploi.

No. de code

Système métrique	Système anglo saxon
C112/1000M (50 Hz)	C112/1000E
C112/1000N (60 Hz)	C112/1000F



Le TALYSURF

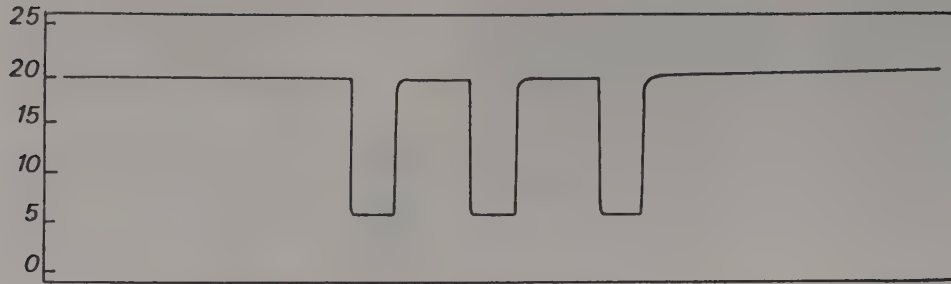
Il délivre les données techniques d'état de surface sous deux formes classiques universellement adoptées :

- un graphique du profil qui représente une section droite des irrégularités de la surface étudiée
- intégrateur R_a (CLA) incorporé travaillant à des longueurs de base sélectionnées (ou cut-offs).

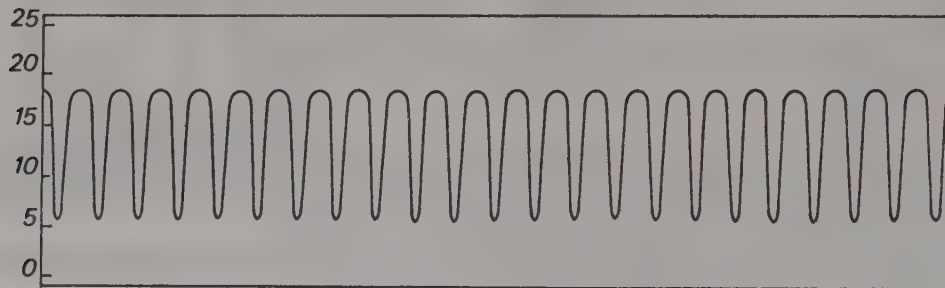
Cette évaluation numérique sert de base au contrôle de qualité de la fabrication.

L'appareil "TALYSURF" emploie un plieur à pointe fine qui suit le profil des irrégularités de surface. On emploie un sabot plat ou un patin arrondi pour obtenir une référence.

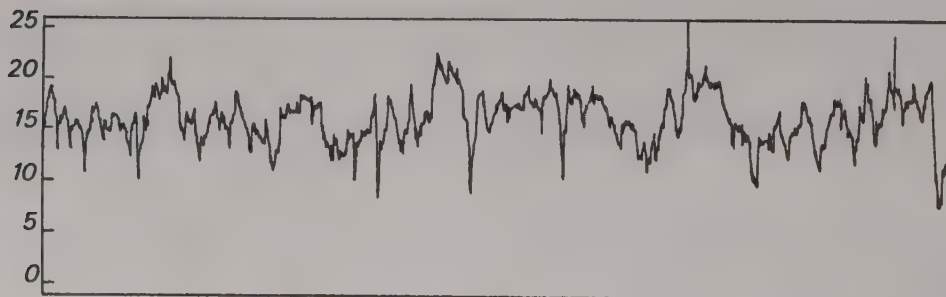
L'ensemble du Pick-up, qui supporte le palpeur et le patin (ou le sabot), se déplace sur la surface mesurée par l'intermédiaire d'un moteur contenu dans la boîte de vitesses. Ses déplacements verticaux, par rapport au patin ou au sabot, sont convertis en variations correspondantes d'un courant électrique. Ces variations sont amplifiées par le groupe électronique et transmises, soit à l'enregistreur, soit à l'intégrateur.



Spécimen Etalon de rugosité (hauteur totale)
 Amplification en ordonnées x 10,000
 Amplification en abscisses x 100
 1 graduation représente 0,025 micron

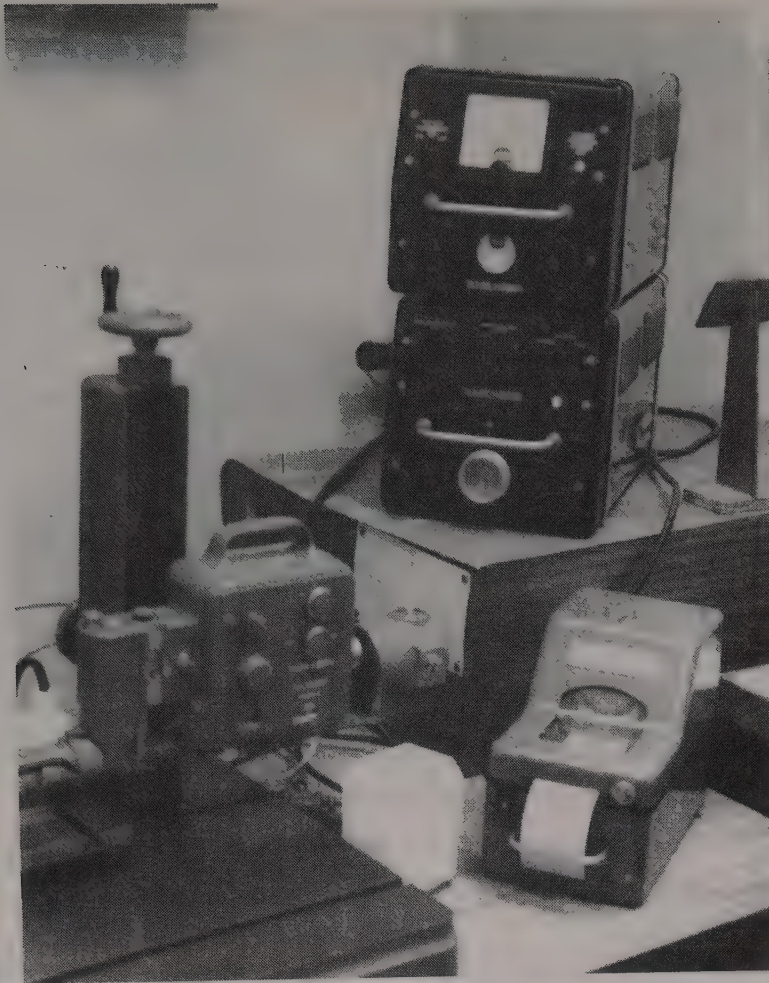


Spécimen Etalon de rugosité Ra (CLA)
 Amplification en ordonnées x 10,000
 Amplification en abscisses x 100

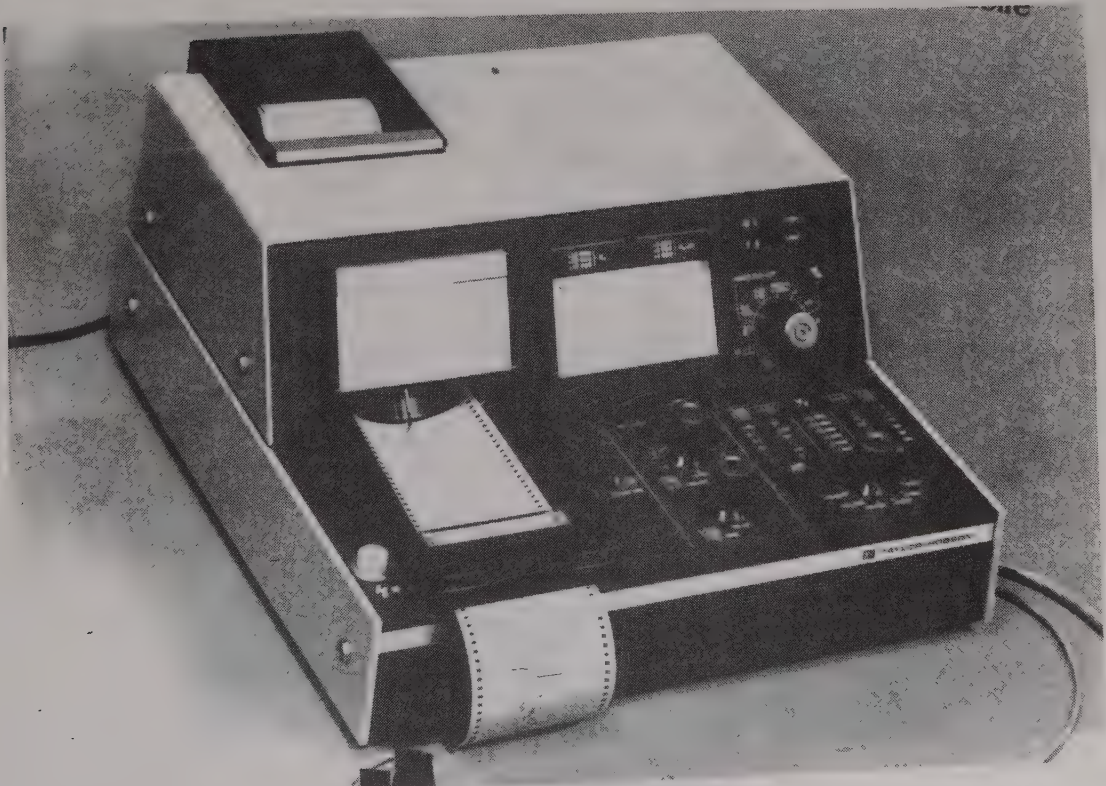


Spécimen Surface rectifiée
 Amplification en ordonnées x 20,000
 Amplification en abscisses x 100
 1 graduation représente 0,1 micron
 Ra (CLA) 0,2 micron

Figure 18



Bloc électronique avec intégrateur.



L'enregistreur du Talysurf.

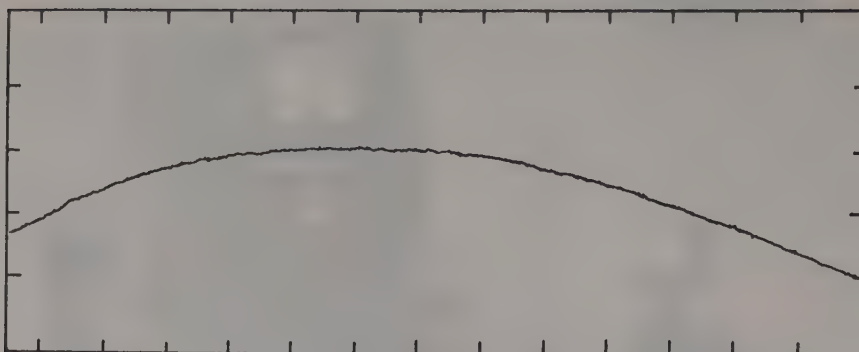


Figure 19: Graphique d'une pastille d'acier polie au diamant, présentant peu de défauts micro-géométriques, mais ayant une surface légèrement convexe.

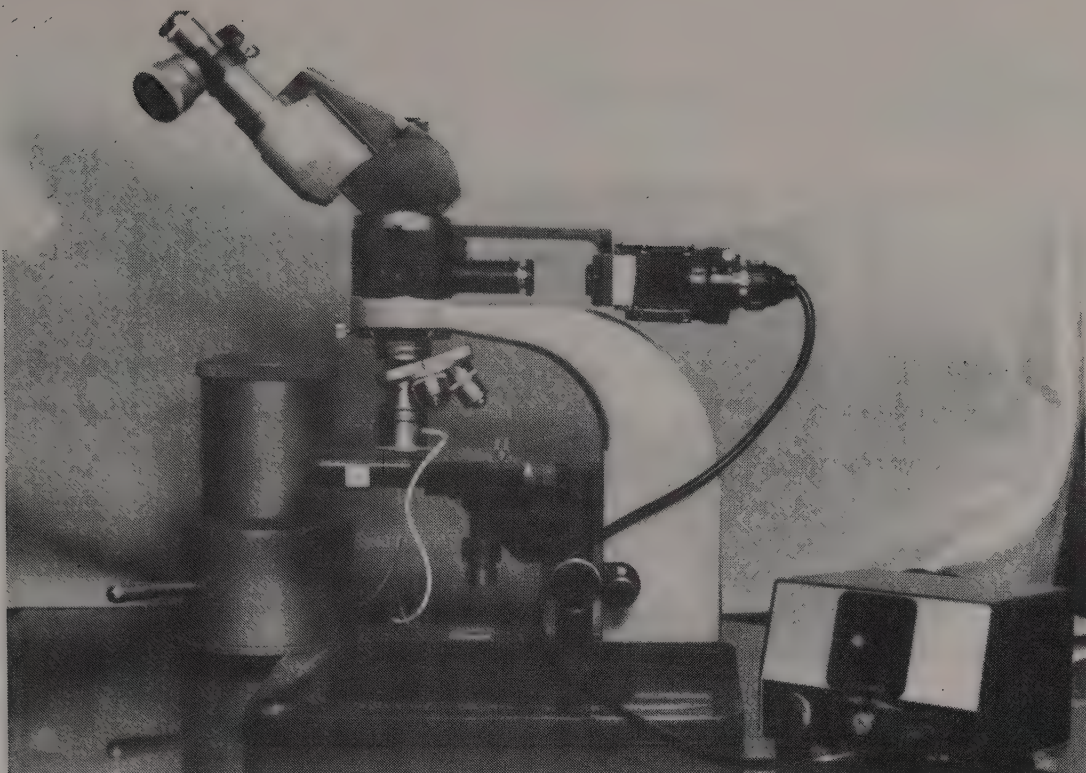
3) La micro-dureté, le microduremètre Vickers

Comme complément à l'étude de l'état de surface des échantillons, il a été procédé à des tests de micro-dureté. On a utilisé à cet effet, le micro-hardness tester de Vickers.

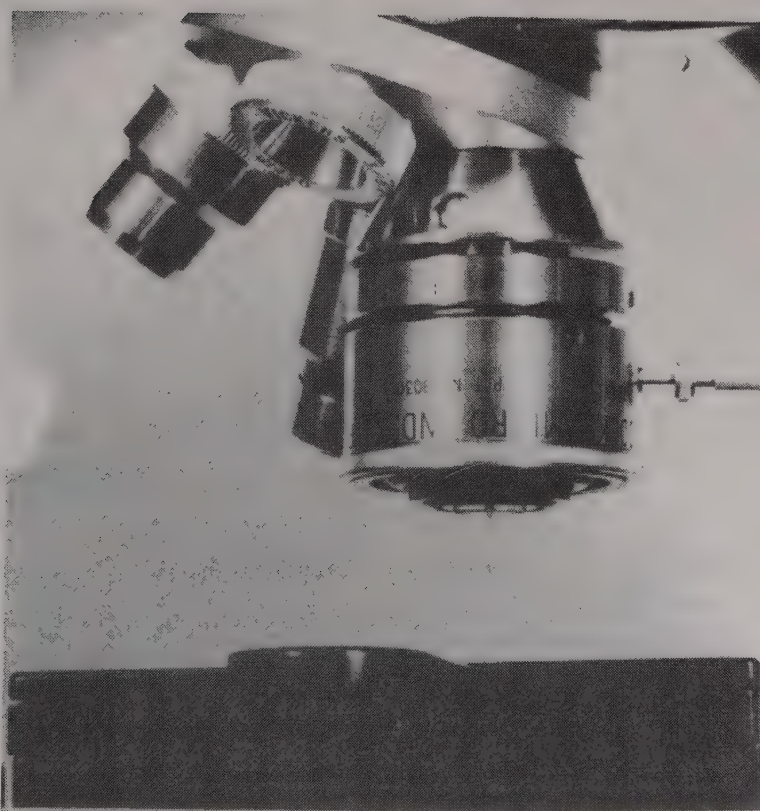
Cet appareillage comprend un microscope à 3 objectifs permettant d'obtenir 3 grossissements différents. A la place d'un de ces objectifs, on dispose un objectif ayant dans son axe, un pénétrateur en diamant pyramidal. Le pénétrateur actionné pneumatiquement est relié à un producteur de charge. La charge est variable de 5 grs en 5 grs et la durée d'application doit être de 20 ou 30 secondes. L'empreinte obtenue est ensuite examinée avec un objectif ayant un agrandissement de 40, 75 ou 120. Après la mise au point, les oculaires micrométriques du microscope, permettent d'évaluer la longueur de la diagonale de l'empreinte et de déterminer l'indice de dureté HVN.

4) La lubrification.

MONASKY utilise une salive artificielle. Nous avons préféré utiliser une salive naturelle fournie par le même manipulateur tout au long des essais. La formule de la salive humaine en général est donnée en annexe.



Ensemble du microscope muni du microduremètre.



Le microduremètre.

III - L'APPAREILLAGE : LE FRICTIOMETRE

Le frictiomètre est l'ensemble de l'appareillage qui permet de produire et d'entretenir un mouvement alternatif, de maintenir les échantillons en contact constant, sous une charge constante.

Il est inspiré de l'appareil utilisé par MONASKY ⁽⁴⁴⁾ et remplit les conditions préconisées par MAHALICK ⁽⁴²⁾. Il a été réalisé sous les auspices de Monsieur MARTY, Directeur du Service de Technologie à l'I.N.S.A.

Le dispositif expérimental est représenté schématiquement sur la figure 20. Il comprend essentiellement :

Un moteur à vitesse variable (1), couplé à un réducteur de vitesse au $1/100 : R$. Le moteur assure l'entraînement du frotteur (2), soumis à une charge (3) qui vient s'appuyer sur l'échantillon maintenu dans le porte-échantillon. Deux plans inclinés (5) permettent de régler la longueur du plan de frottement et d'obtenir des contacts intermittents entre les 2 échantillons immergés dans de la salive naturelle.

L'ensemble est sous le contrôle d'un coffret de commande électronique.

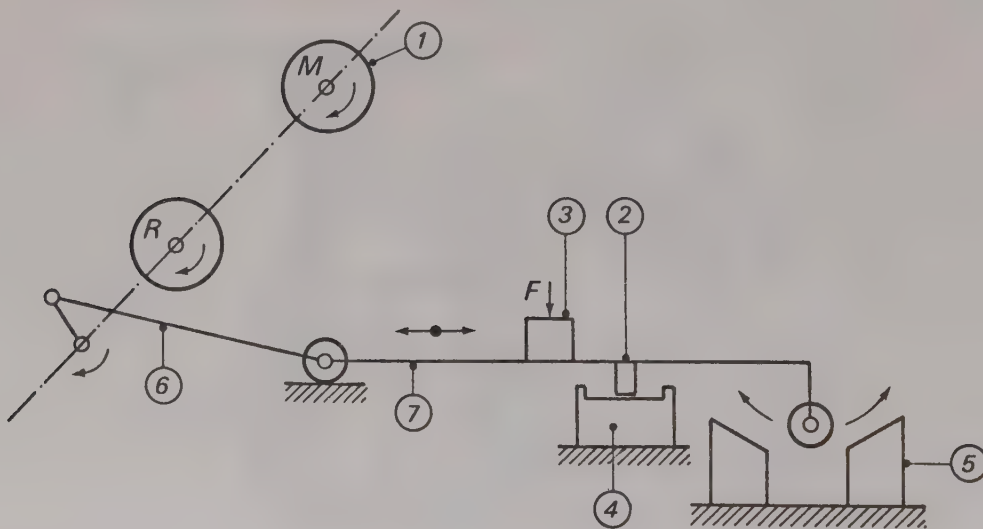


Figure 20 : Schéma du dispositif expérimental :

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1 - Moteur | 6 - Bielle |
| 2 - Frotteur | 7 - Chariot |
| 3 - Porte charge | 8 et 8 bis - Roulements à billes |
| 4 - Porte échantillon | 9 - Roulements à billes |
| 5 - Plans inclinés | 10 - Bloc guide |

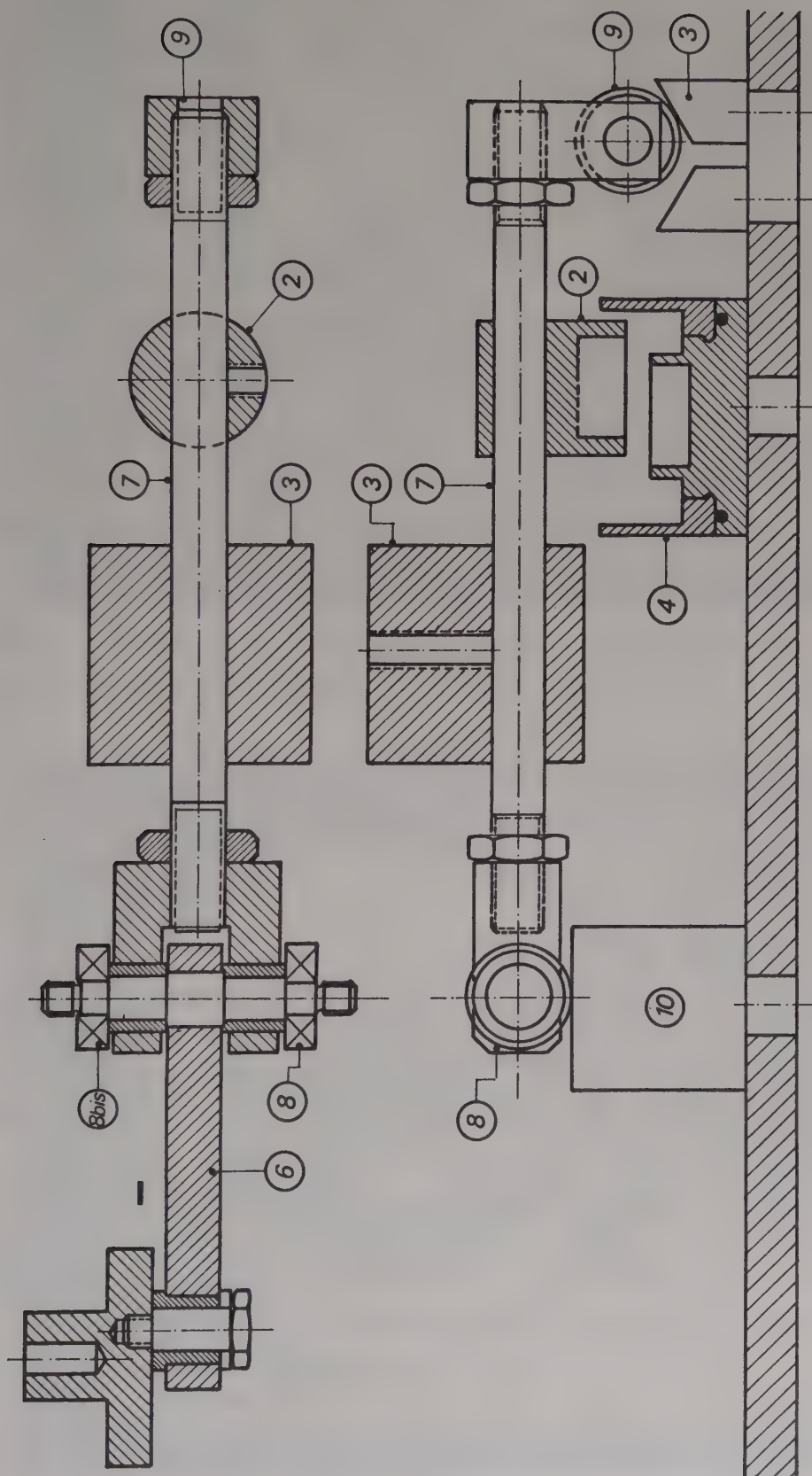


Figure 21 : Plan d'ensemble :

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1 - Moteur | 6 - Bielle |
| 2 - Frotteur | 7 - Chariot |
| 3 - Porte charge | 8 et 8 bis - Roulements à billes |
| 4 - Porte échantillon | 9 - Roulements à billes |
| 5 - Plans inclinés | 10 - Bloc guide |

1) Le dispositif d'entraînement

Le moteur générateur a une puissance de 26 Watts. L'amplificateur a une faible dérive, et une compensation en température du moteur permettent d'obtenir, pour des variations de couples de 50 % autour de la valeur nominale, une régulation de vitesse stable à moins de 0,5 % près, sur une plage de vitesse allant de 6 à 5000 tours/minute.

Le réducteur de rapport 100 permet de vaincre des couples plus résistants de 6,6 mN.

Le coffret de commande électronique comprend un tachymètre de précision qui indique en permanence la vitesse de rotation du moteur. La fiabilité et la précision de cet ensemble permettent de connaître le nombre de cycles à partir de la mesure du temps des essais. En outre, il est aisé de reproduire dans le temps, les mêmes conditions cinématiques. La vitesse de rotation retenue, en sortie du réducteur est de 30 tours/minute, soit 1800 cycles/heure ou 3600 contacts entre les échantillons par heure.

2) Le dispositif de mise en contact intermittent

Le réducteur est muni d'un axe sur lequel est fixé un excentrique qui, par l'intermédiaire d'une bielle (6) entraîne le chariot (7) sur lequel est fixé le porte-échantillon (2). Le chariot porte-échantillon, élément mobile, est guidé par 3 roulements à bille (8 - 9). Les points d'appui des 3 roulements définissent le plan de contact entre les échantillons. Les 2 roulements à bille jumelés (8) et (8 bis) s'appuient sur un bloc guide (10), alors que le 3ème roulement (9) prend appui sur les plans inclinés.

L'excentrique ayant un rayon fixe de 5 mm, le réglage de la course utile de frottement se fait en rapprochant ou en éloignant les plans inclinés de façon à assurer le dégagement vertical du chariot porte-échantillon.

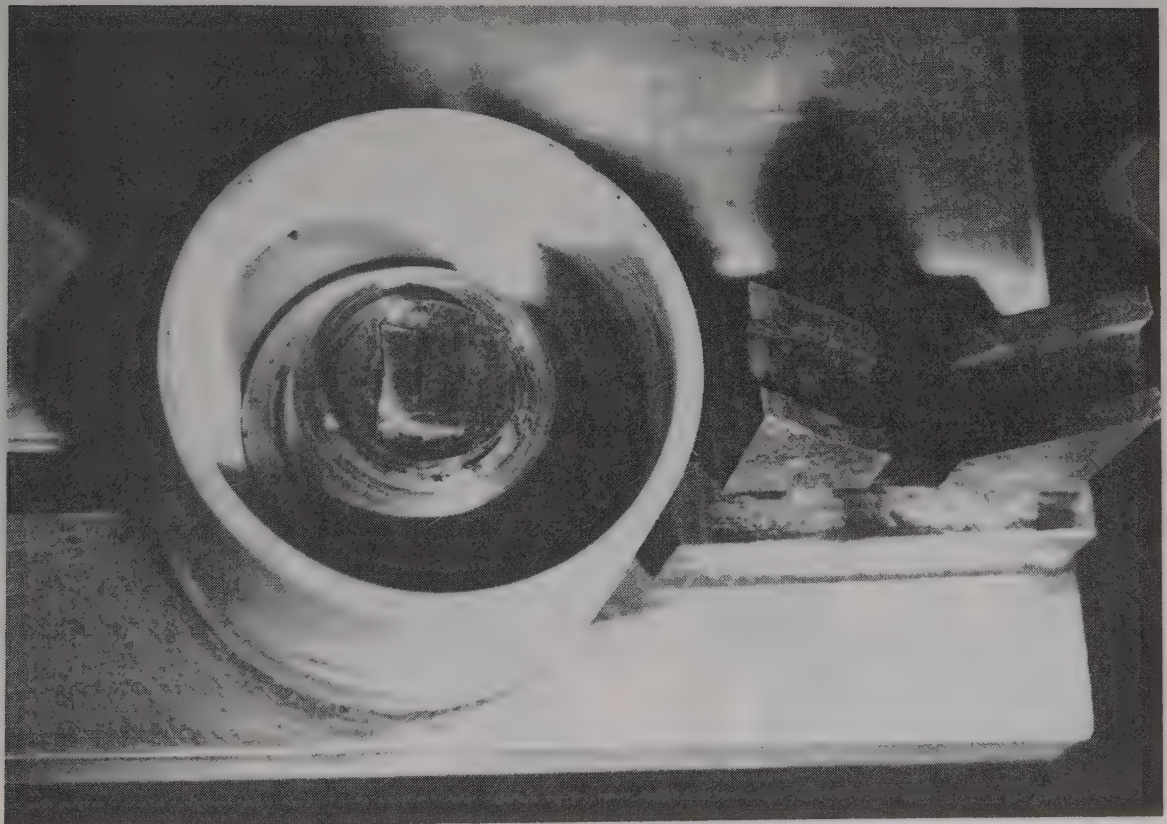
3) Le dispositif de mise en charge (figure 21)

Dans un premier montage, afin de procéder à des tests de nombreux couples, nous avons réalisé un poste d'essai comprenant 8 couples travaillant simultanément. La mise en charge de chaque couple était assurée par la compression de ressorts. Du fait de l'imprécision du réglage de la poussée des ressorts, et de la variation de la charge en cours d'essai, il a fallu abandonner cette solution.

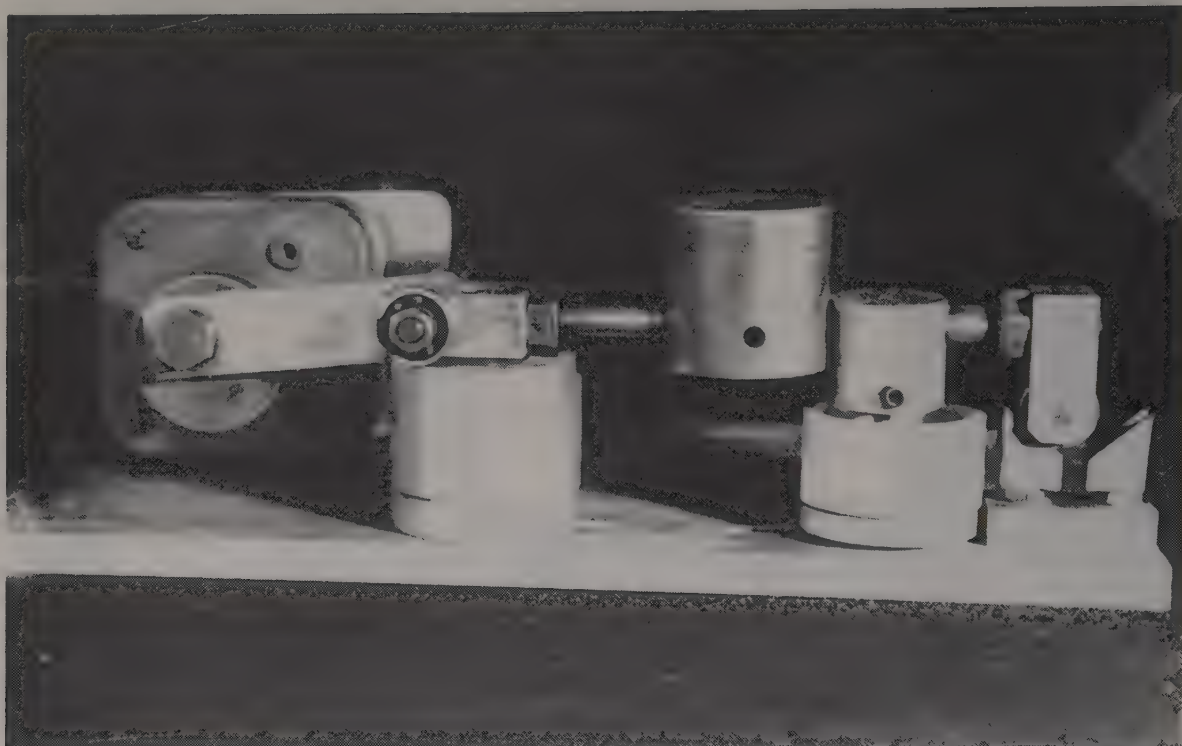
Le nouvel appareillage ne peut tester qu'un seul couple à la fois, ce qui nous a contraint à nous limiter dans le choix des couples. Dans le montage définitif, il a été utilisé une charge statique constituée par des poids, de valeur déterminée, et positionnée sur l'axe du chariot (3). La charge est donc constante tout au long des essais et des charges identiques pour des essais successifs sont obtenus sans difficultés. Ce qui nous importe plus que la charge est la pression exercée au niveau des échantillons, aussi les valeurs des poids constituant la charge sont définies en fonction de la surface de contact des échantillons. Les masses utilisées variaient selon les cas de 400 à 1600 grs.



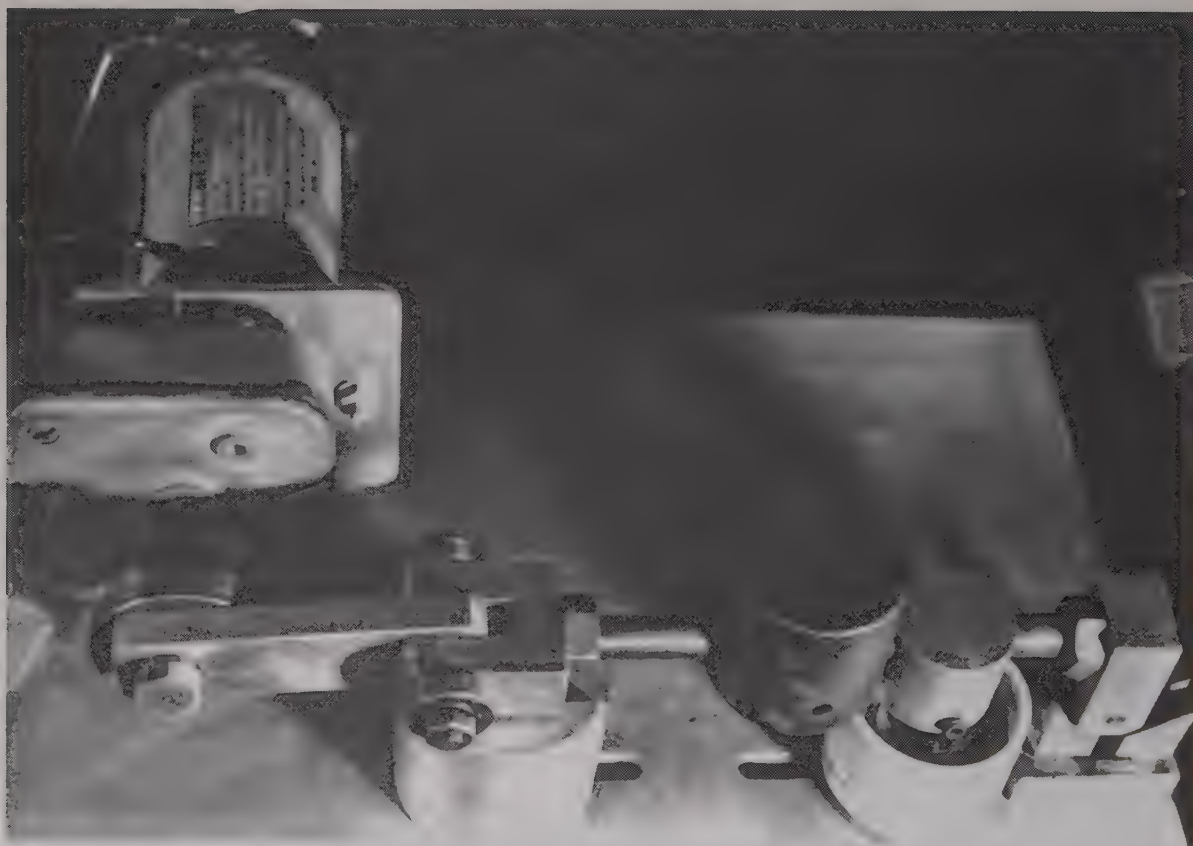
Le coffret de commande électronique



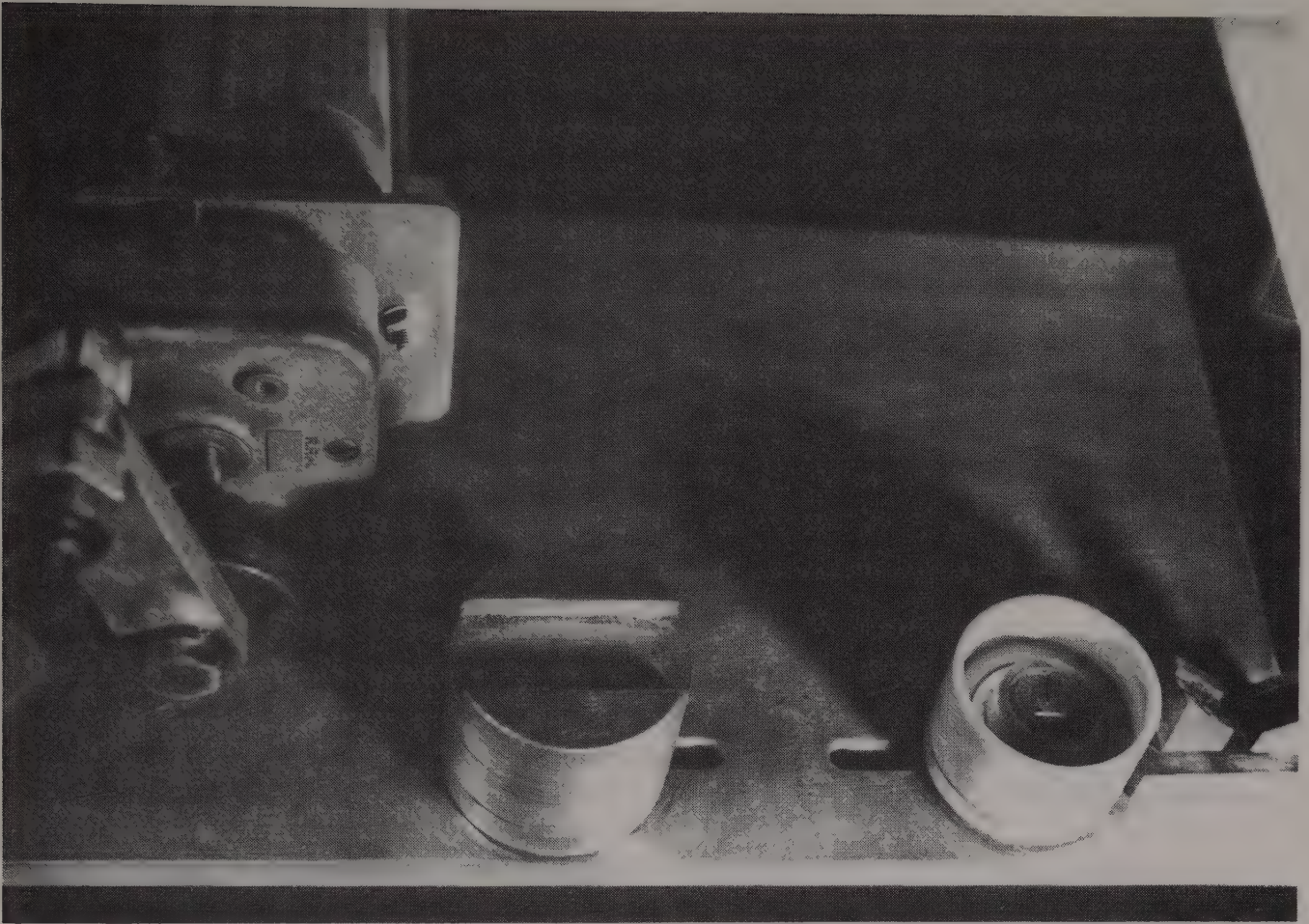
Echantillon dans son porte-échantillon inférieur, et plans inclinés assurant la rupture de contact.



Vue latérale du frictiomètre



Vue de dessus du frictiomètre



Au centre, le bloc guide, à droite le porte-échantillon,
à l'extrême droite les plans inclinés.

4) Analyse critique du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental ainsi réalisé assure un frottement intermittent entre les échantillons immergés dans de la salive naturelle.

L'emploi d'une salive naturelle comme lubrifiant évite tout effet parasite susceptible d'être introduit par une salive artificielle : liquide polaire, viscosité ...

La fréquence de 30 cycles /mn a été retenue, car elle n'introduit pas d'effets secondaires appréciables (élévation de température, sollicitation à la fatigue intensive). Les plans inclinés qui, à chaque fin de course assuraient le dégagement et la lubrification des surfaces en regard, réalisent une mise en contact intermittente sous une charge simulant ainsi la rencontre de dents antagonistes avec une mise en contact à une vitesse d'approche non nulle (15,7 cm/sec.) assez proche de celle qui se produit lors de la déglutition. Des vitesses d'approche excessives créeraient des forces d'impact non physiologiques, et fausseraient les résultats.

Essai d'évaluation des forces exercées sur la canine.

Afin de déterminer une fourchette de charges satisfaisantes et pas trop éloignées des conditions buccales, nous avons effectué des essais d'évaluation de forces qui s'exercent au niveau des canines au moment de la déglutition.

Dans le même service de Technologie de l'I.N.S.A. il a été réalisé un capteur constitué de 2 poutres semi-encastées (figure 22) dont la déformation est mesurée à l'aide de 2 jauges de contraintes : l'une fixée sur une partie non sollicitée sert de référence, l'autre est située au point d'inflexion d'un des éléments de la bi-poutre.

Un montage en demi-pont de WHEASTONE (b) permet la mesure. On obtient une courbe d'étalonnage pour diverses sensibilités (c).

Ce dispositif, du fait de son épaisseur et de divers réflexes physiologiques, introduit une modification de la cinématique mandibulaire et altère les forces de contact lors de la déglutition. Il n'est donc pas satisfaisant pour l'évaluation des forces exercées sur les canines.

Aussi, avons-nous été conduit à effectuer les essais sous diverses charges afin d'étudier l'influence de ce paramètre, qui est primordial sur l'évolution de l'usure en général.

IV - MESURES ET CONTROLES

Les spécimens ayant été préparés, c'est-à-dire enrobés, polis, parallélisés l'un sous l'autre, les contrôles préliminaires ont consistés en l'examen :

- des états de surface
- au test de microdureté
- à la mesure géométrique.

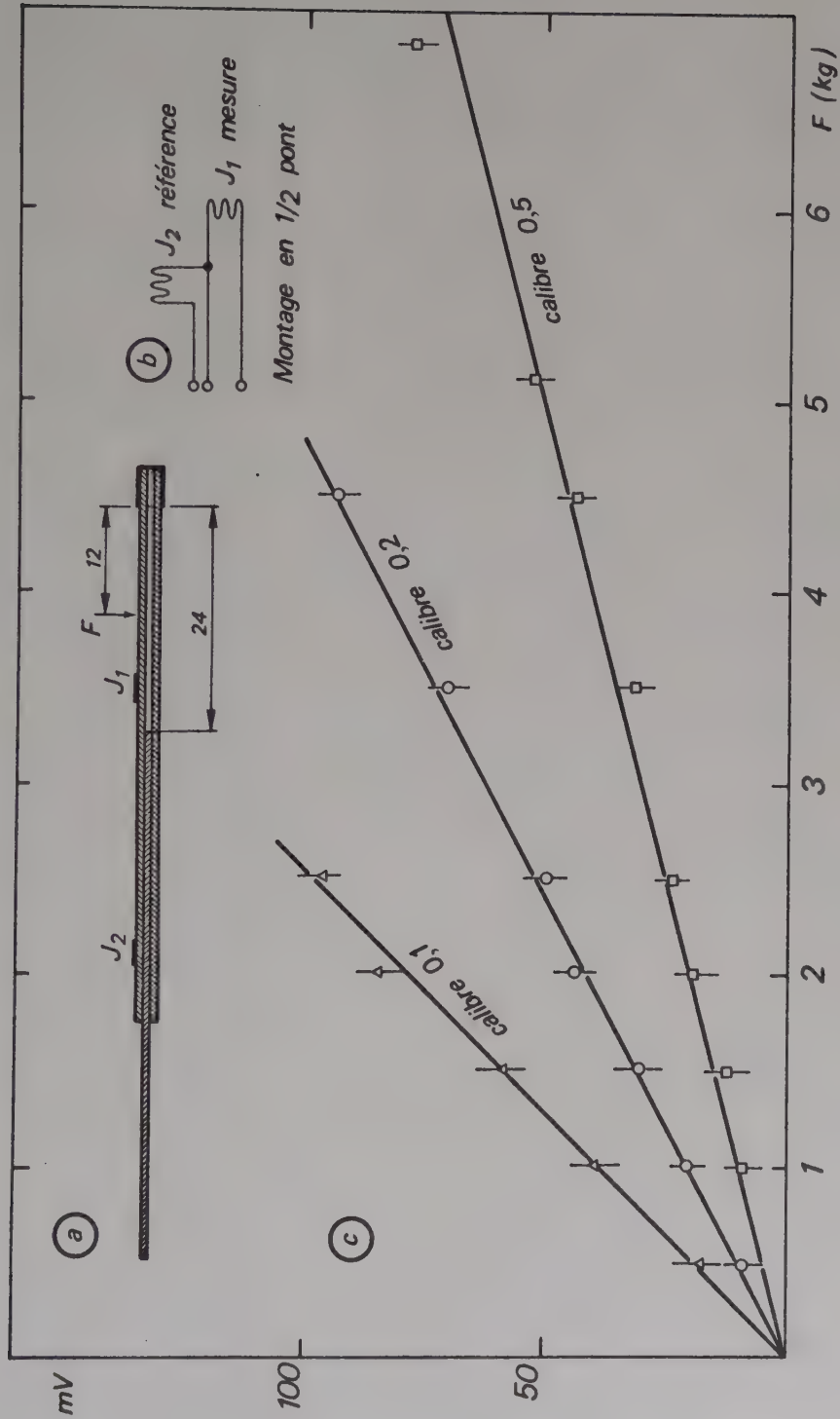


Figure 22 : Essais d'évaluation des forces :

- a - jauges de contrainte
- b - montage en demi-pont de Wheatstone
- c - courbe d'étalonnage

Nous n'avons pas retenu la mesure par pesée, compte-tenu de la faible perte de poids à évaluer, et de la difficulté d'amener pour chaque mesure, les échantillons dans un même état hygrométrique.

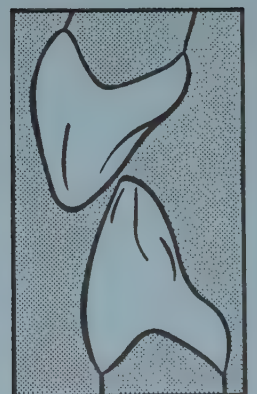
L'évaluation de l'usure a donc été effectuée sur les 2 échantillons plot et frotteur, par mesure géométrique.

Pour le frotteur, il a été utilisé un micromètre palmer au 0,01 mm. Pour le plot, il a été utilisé un microscope équipé d'un déplacement micrométrique à $\pm 1 \mu\text{m}$ pour évaluer la profondeur du sillon d'usure.

Les charges utilisées ont été celles qui ont permis d'obtenir des pressions au niveau des échantillons de : 50, 85, 100, 125, 175, 300 g/mm².

Les relevés ont été étalonnés sur un nombre de cycles allant de : 25, 50, 100, 125 x 10³ cycles, soit approximativement des durées de : 14, 28, 42, 56, 80 heures.

B ~ Résultats



I - LES VARIATIONS DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX TESTES

Ils indiquent essentiellement les variations :

- de l'état de surface
- de la microdureté
- géométriques ou évaluation de l'usure.

1) LES VARIATIONS DES ETATS DE SURFACE

Les enregistrements ci-après donnent les relevés de surface avant et après essai (suivant la durée indiquée dans le tableau I :

Figure 23 - E frottant sur de l'Or

Figure 24 - E frottant sur l'Email

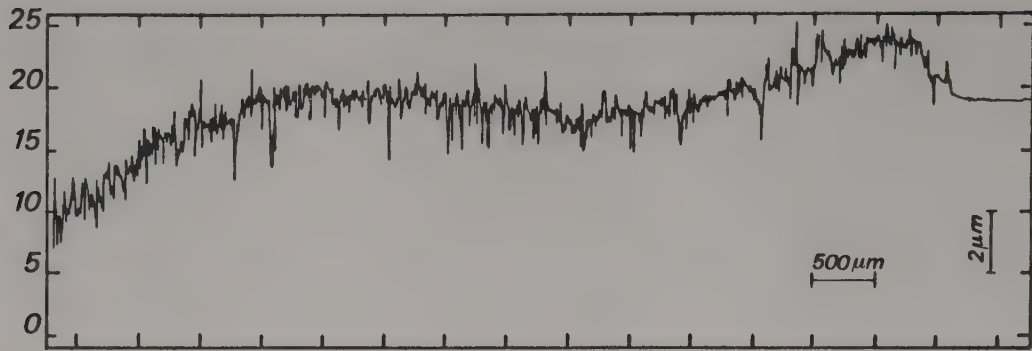
Figure 25 - E frottant sur la Résine (état de surface de la résine en tant que plot)

Figure 26 - E frottant sur la Résine (état de surface de l'E sur le plot)

Figure 27 - E frottant sur la Céramique

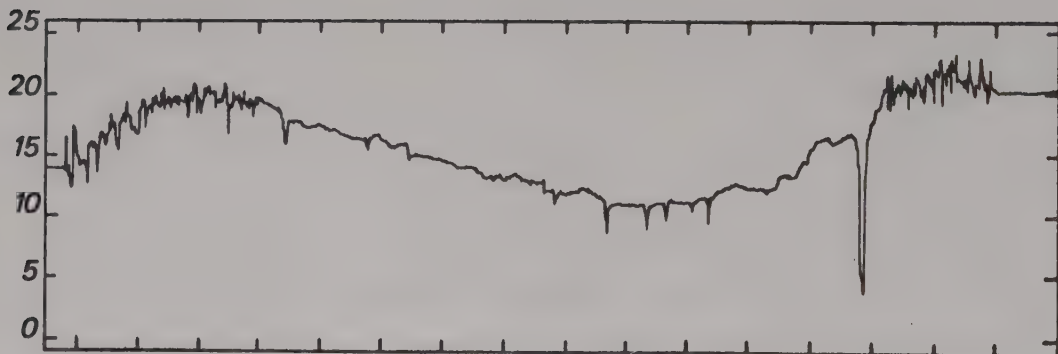
Figure 28 - E frottant sur le Chromanit

Figure 29 - E frottant sur le Ticon



Etat de surface de l'échantillon Or avant essai

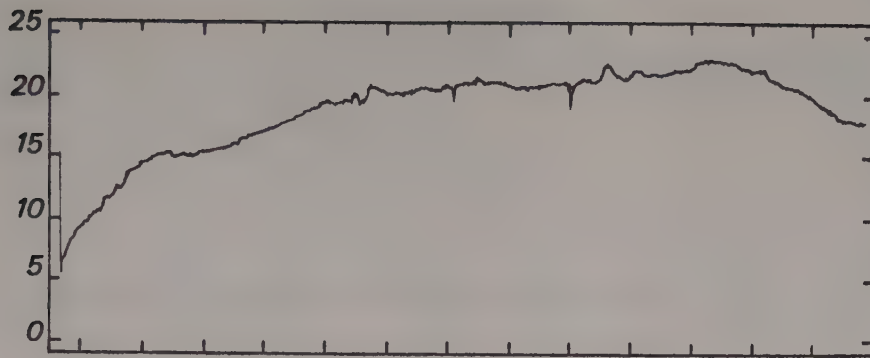
Ra = 0,35 CLA.



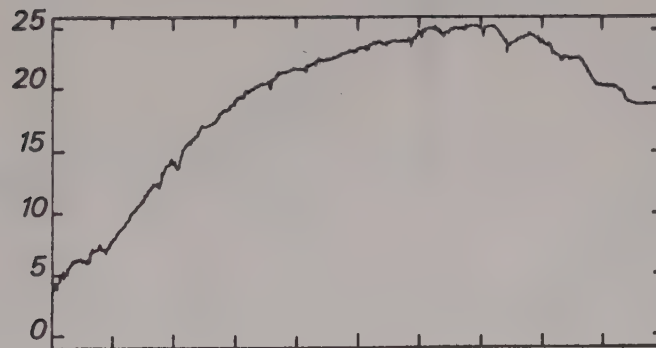
Etat de surface de l'échantillon Or après essai

Ra = 0,22 CLA.

Figure 23

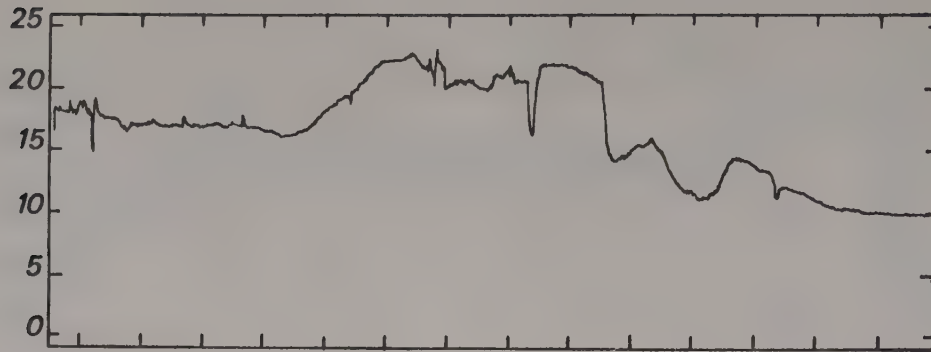


Etat de surface de l'échantillon émail avant essai
 $R_a = 0,3 \text{ CLA.}$



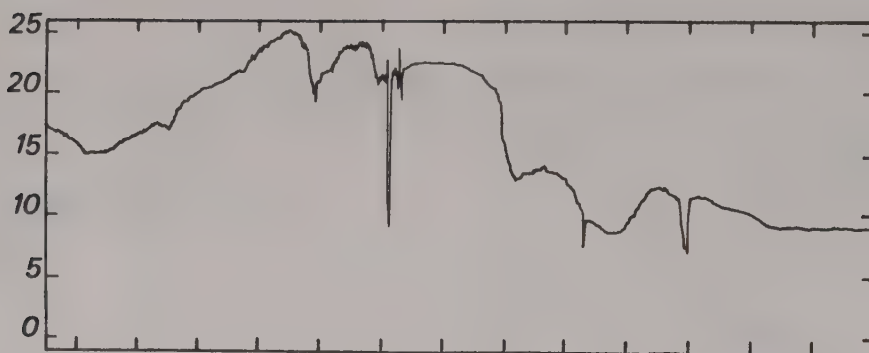
Etat de surface de l'échantillon émail après essai
 $R_a = 0,14 \text{ CLA.}$

Figure 24



Etat de surface de l'échantillon résine avant essai

Ra = 0,4 CLA



Etat de surface de l'échantillon résine après essai

Ra = 0,34 CLA

Figure 25

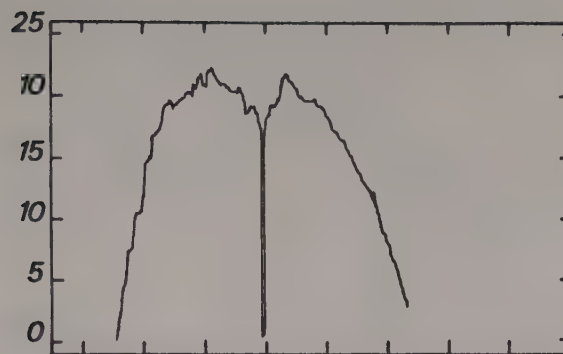


Figure 26 : Etat de surface de l'émail après essai sur la résine
Ra = 0,9 CLA

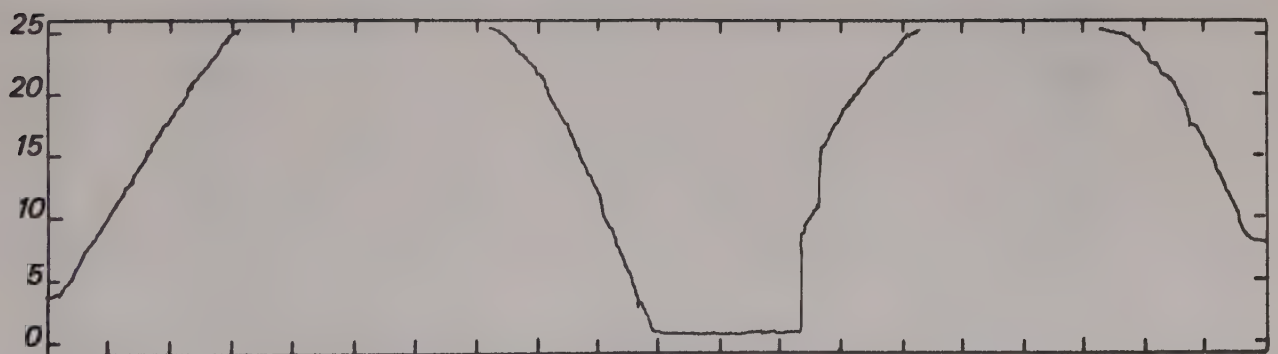
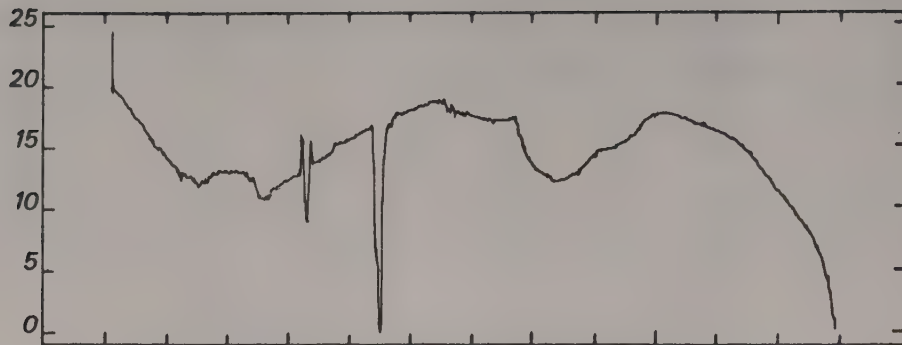
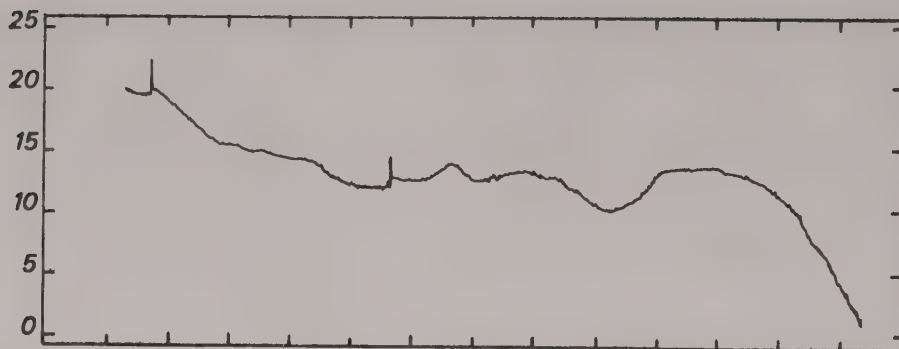


Figure 27 : Etat de surface de la porcelaine avant et après essai
(cet échantillon présente une surface bombée de 10 μm
par rapport au plan de base empêchant la mesure du Ra).



Etat de surface de l'échantillon chromanit avant essai
Ra = 0,12 CLA

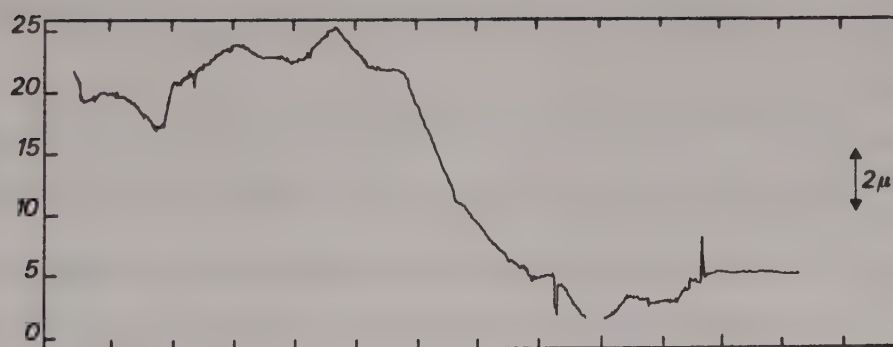


Etat de surface de l'échantillon chromanit après essai
Ra = 0,06 CLA

Figure 28



Etat de surface de l'échantillon ticon avant essai
Ra = 0,27 CLA



Etat de surface de l'échantillon ticon après essai
Ra = 0,18 CLA

Figure 29

a) Disparités

A l'examen de ces graphiques, on constate une disparité dans le profil et les détails de ces courbes. Cette disparité met en évidence l'impossibilité de réaliser des états de surfaces identiques, sur des échantillons de nature différente. En effet, un même mode de préparation de surface ne donne pas un même état de surface, bien que les procédés d'élaboration soient les mêmes (vitesse de coupe, avance, lubrification ...).

b) Défauts

Les relevés de profil des échantillons, préparés par une polisseuse mécanique font apparaître les défauts suivants :

α) Défauts macrogéométriques de 1er et de 2ème ordres, de faible amplitude

La planéité des surfaces n'est pas atteinte. Une ondulation existe sur la plupart des échantillons : l'amplitude maximum dans les divers cas, est inférieure à : 10 microns sur des pas de 4 à 5 mm. Ces irrégularités de faible amplitude et de grande longueur d'onde, ne sont pas susceptibles de mettre en cause la validité des essais.

β) Défauts microgéométriques de 3ème ordre ou rugosité moyenne

Ces défauts peuvent être en partie caractérisés par le critère R_a , ou moyenne arithmétique de la valeur absolue de la différence d'ordonnées entre chacun des points du profil d'une part, et la ligne moyenne, sur une longueur d'évaluation donnée.

Les échantillons testés ont la plupart un R_a compris entre 0,3 et 0,6 μm .

Certains échantillons cependant, tels la résine ont un R_a voisin de 1 μm .

γ) Défauts de rugosité microgéométrique de 4ème ordre

La rugosité totale R_t , ou distance entre le sommet le plus haut et le creux le plus profond, sur une longueur d'onde LR , ainsi que la rugosité maximum R_{max} ou valeur maximum de la distance saillie-creux, rencontrée sur une longueur d'onde LR , ont une dispersion analogue à celle des R_a .

c) Etats de surface avant et après essai

Tableau des variations du Ra CLA μm		
Frotteur / Plot	Avant essai	Après essai
Email / or	0,35	0,22
	0,39	0,19
émail	0,3	0,14
	0,15	0,08
résine	0,4	0,34
	1,2	0,35
porcelaine polie non glacée	1,7	0,63
chromanit	0,12	0,06
	0,11	0,075
ticon	0,23	0,1
	0,27	0,18

Tableau 24

d) Observations

La présence de ces rugosités joue un rôle important, car elles déterminent la surface réelle de contact (BOWDEN TABOR ⁽¹¹⁾, CAUBET ⁽¹⁷⁾). Comme nous le constaterons ultérieurement en début d'essai, la vitesse d'usure est plus grande; cette période peut être considérée comme une période d'adaptation ou de rodage (coup de râpe initial - MARCELIN ⁽⁴³⁾). La vitesse d'usure obtenue après ce stade, est plus significative du comportement intrinsèque du matériau. Les relevés de profils après usure, montrent pour tous les matériaux une disparition partielle des rugosités.

2) LES VARIATIONS DE LA MICRODURETE

Les échantillons fixes et mobiles ont été testés au Micro Tester de Vickers avant et après friction, sous une force de 50 grs, au niveau du pénétrateur d'une durée d'application de 20 ". Les valeurs ont été les suivantes en H.V.N. *

* H.V.N. : Hardness Vickers Number

Micro dureté avant essais		Nb de cycles	Pression gr.mm ²
Frotteur	Plot		
Email 344	Email 350		
Email 290	Chromanit H 339		
Email 350	Céramique 475		
Email 325	Ticon 396		
Email 371	Or 283		
Email 309	Résine 64		

Tableau 25

Les échantillons d'émail, taillés en forme parallélépipédique, ont été façonnés d'après des dents anciennement extraites et conservées en milieu aqueux formolé. L'hétérogénéité des micro duretés s'expliquent par l'hétérogénéité d'origine des dents d'une part, et l'origine des préparations sur une même dent d'autre part, la micro dureté variant selon le niveau de la couche d'émail.

Les micro duretés ont les valeurs moyennes suivantes (sous 50 grs) :

Matériaux	Dureté moyenne avant essai	Dureté moyenne après essai
Email	309 < Hv < 371	318 < Hv < 374
Ticon	396	430
Ch. H	339	362
Or	283	330
Céramique	475	445
Résine	64	70

Tableau 26

Ce tableau permet de constater les variations de dureté des matériaux métalliques après avoir subi l'action d'un frotteur en émail, au temps correspondant à l'essai effectué.

Il s'est produit une altération superficielle de ces matériaux métalliques, due à un phénomène d'écrouissage, c'est-à-dire une consolidation de la couche superficielle due à des réactions non élastiques du métal, face aux sollicitations extérieures.

Sous les faibles charges moyennes appliquées, on doit considérer que cet effet d'écrouissage se produit, car dans les premiers instants de l'essai, les imperfections micro et macro géométriques entraînent un contact réduit des surfaces, et suscitent par voie de conséquence, des forces tangentielles élevées.

3) LES VARIATIONS GEOMETRIQUES OU EVALUATION DE L'USURE DE L'EMAIL

a) Couple émail-émail (figure 30)

L'usure du frotteur émail a été évaluée d'après la variation dimensionnelle de la hauteur de l'échantillon. Cette variation est portée sur l'ordonnée, alors que l'abscisse indique la durée de l'essai, d'après le nombre de cycles, avec des intervalles de 25 000 cycles. Un cycle représentant 2 contacts, le nombre de contacts est donc étagé de 50 à 250 000 contacts.

Par heure, il y a 1 800 cycles ou 3 600 contacts.

25 000 cycles	}	≠ 14 heures
50 000 contacts		
50 000 cycles	}	≠ 28 heures
100 000 contacts		
100 000 cycles	}	≠ 56 heures
200 000 contacts		

Afin d'évaluer l'influence de la force appliquée, les essais ont été répétés sous diverses charges, de façon à obtenir une pression donnée, quelle que soit la surface portante de l'échantillon.

Dans l'essai émail/émail, les pressions retenues ont été de 50, 85, 125, et 175 grs/mm². Sous une pression de 175 grs/mm², l'usure est immédiate et très rapide. Quand la pression passe de 85 à 175 grs/mm², l'usure est multipliée par un coefficient de l'ordre de 5.

Cet accroissement brutal pourrait être dû à des fractures de prismes de l'émail dont les résidus jouent le rôle d'abrasif entre les surfaces en regard.

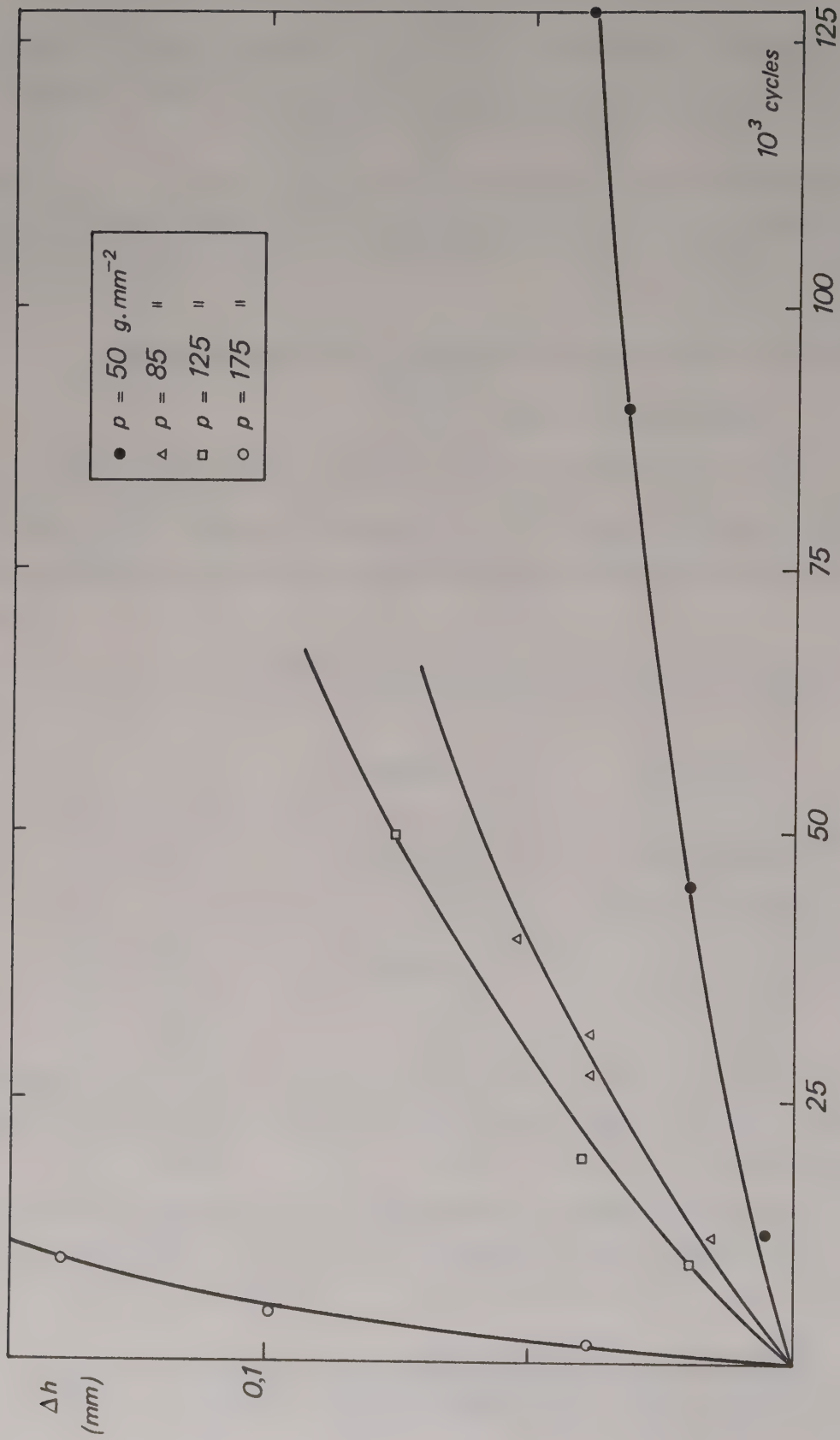


Figure 30 : Couple émail-émail.

b) Couple émail-porcelaine (figure 31)

L'évaluation générale est identique, à savoir une usure rapide en début d'essai sous charge élevée. Ici, cependant, même sous faibles pressions (50 grs/mm^2) la diminution de l'échantillon est plus rapide que celle du couple émail/émail. L'usure de $0,1 \text{ mm}$ observée sur le frotteur émail face à la céramique sous 50 grs/mm^2 , serait obtenue dans le couple émail/émail sous une pression de 150 grs/mm^2 , c'est-à-dire 3 fois supérieure. Il s'ensuit que l'effet abrasif de la céramique serait 3 fois plus grand que celui de l'émail.

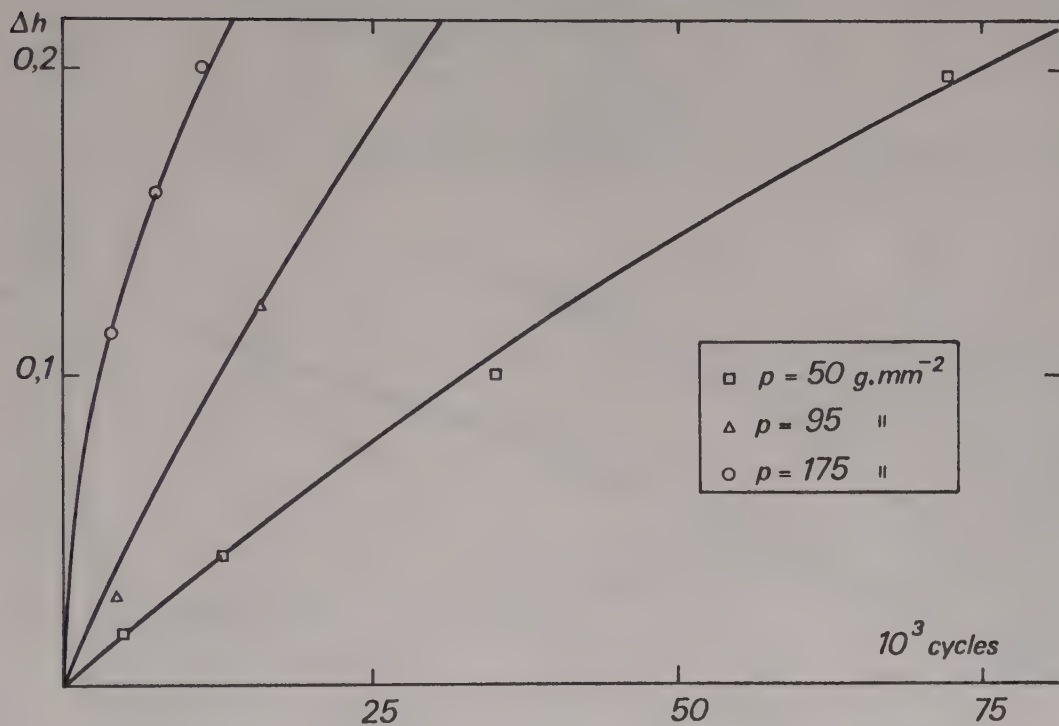


Figure 31 : Couple émail-céramique

c) Couple émail-chromanit H (figure 32)

Les pressions utilisées ont été de 80 et 175 grs/mm². La légère concavité des courbes semble indiquer l'existence d'un processus d'adaptation de faible importance. Au cours de cet essai, la couche d'émail ayant complètement disparue, il a été possible de noter l'usure de la dentine sous une pression identique (175 grs/mm²). On constate une usure bien plus importante de la dentine du fait de ses propriétés minéralogiques, physiques, et entre autres, de sa dureté ($\neq$ 30 HVN) moindre.

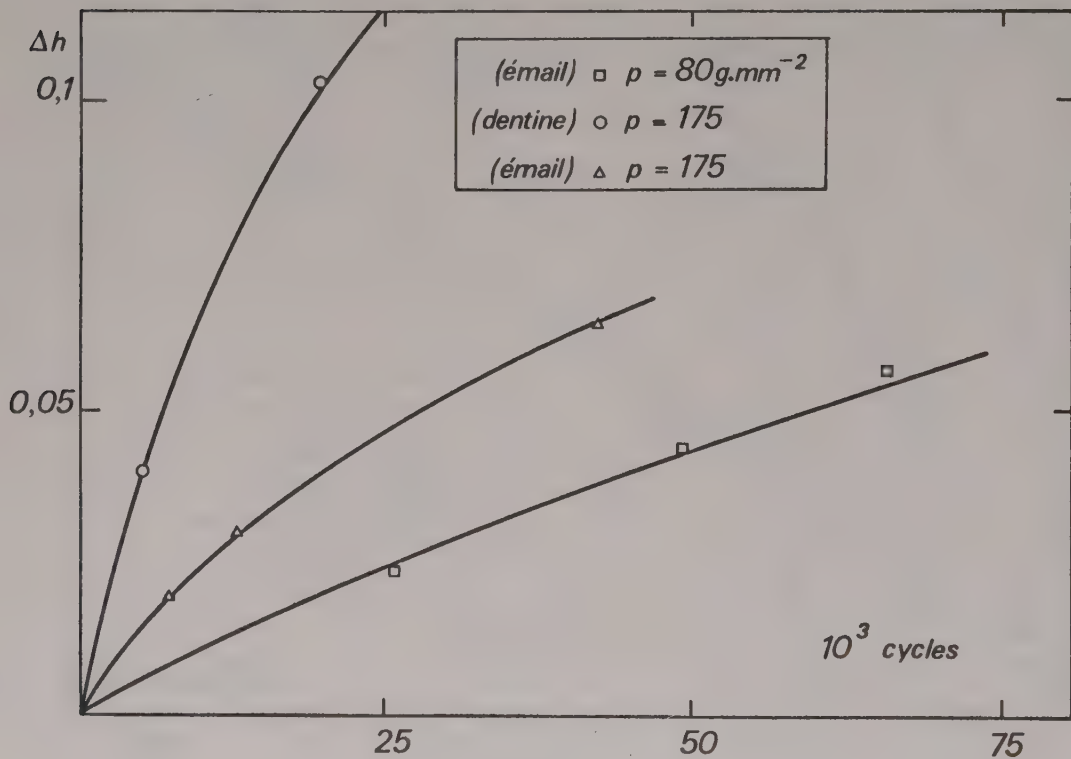


Figure 32 : Couple émail-chromanit H

d) Couple émail-or (figure 33)

Les pressions utilisées ont été de 150 et 300 grs. La forme concave des courbes, indique un processus d'adaptation ou de rodage plus important que pour les autres matériaux. La vitesse d'usure est plus importante en début d'essai que par la suite. Ceci pourrait être dû à un transfert moléculaire par adhésion (TABOR MONASKY ⁽⁴⁴⁾).

La vitesse diminue ensuite pour devenir sensiblement constante dans le temps. Le graphique indique, en outre, que sous une pression de 300 grs/mm², l'usure de l'E/or est inférieure; une même usure pourrait être obtenue respectivement pour des pressions de 75 grs/mm² sur la céramique et de 130 grs/mm² pour l'émail.

Donc, l'usure provoquée par l'Or est moindre.

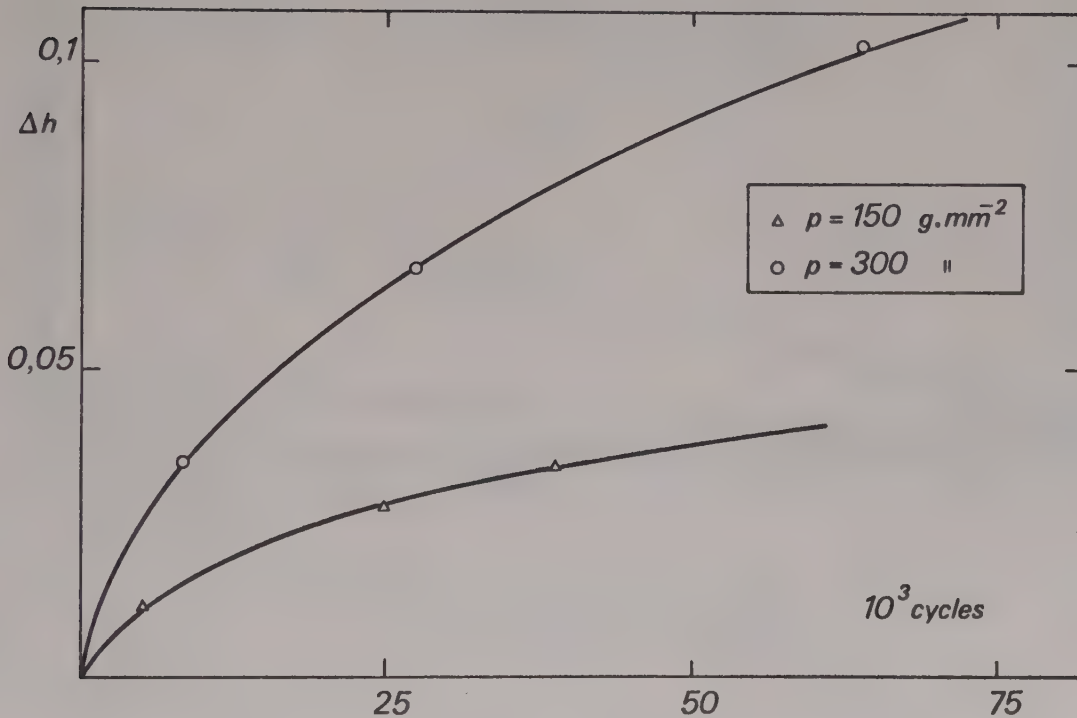


Figure 33 : Couple émail-or

e) Couple émail-ticon (figure 34)

Les pressions utilisées ont été de 100 et 175 grs. L'émail a un comportement assez voisin du couple émail/or. La phase d'adaptation est peu marquée; mais l'usure sous charge égale est moindre que dans les cas précédents. Le ticon semble donc plus intéressant que l'or, dans ce contexte du comportement face à l'usure.

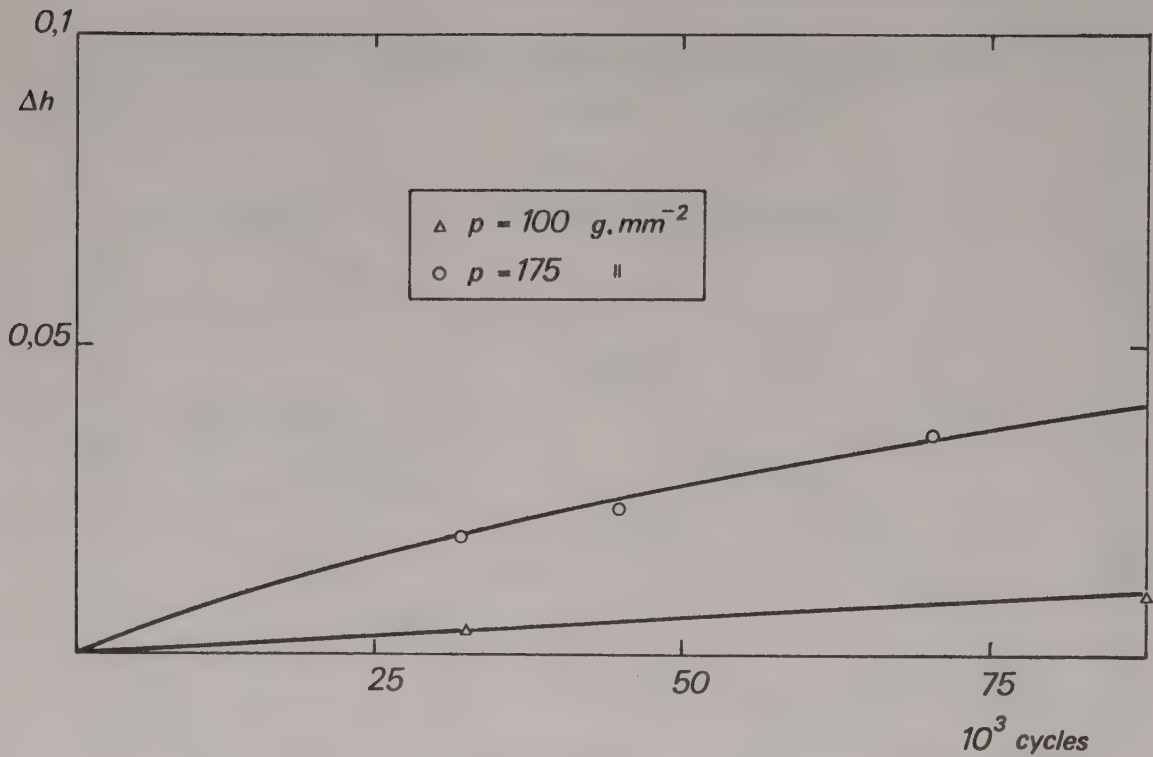


Figure 34 : Couple émail-ticon

f) Couple émail-résine acryl (figure 35)

Les pressions utilisées ont été de 50 et 80 grs. L'usure de l'émail face à la résine est insignifiante. Par contre, le sillon réalisé par l'émail sur la résine est très profond, de l'ordre de 36 μm , soit 4 à 5 fois plus profond que celui observé sur l'or ou le ticon (figure 35, tableau 28).

Accidentellement, l'émail ayant disparu lors de la préparation de l'échantillon, on a pu noter l'effet d'un frotteur dentine sur la céramique. On constate une usure importante de la dentine (purement informatif).

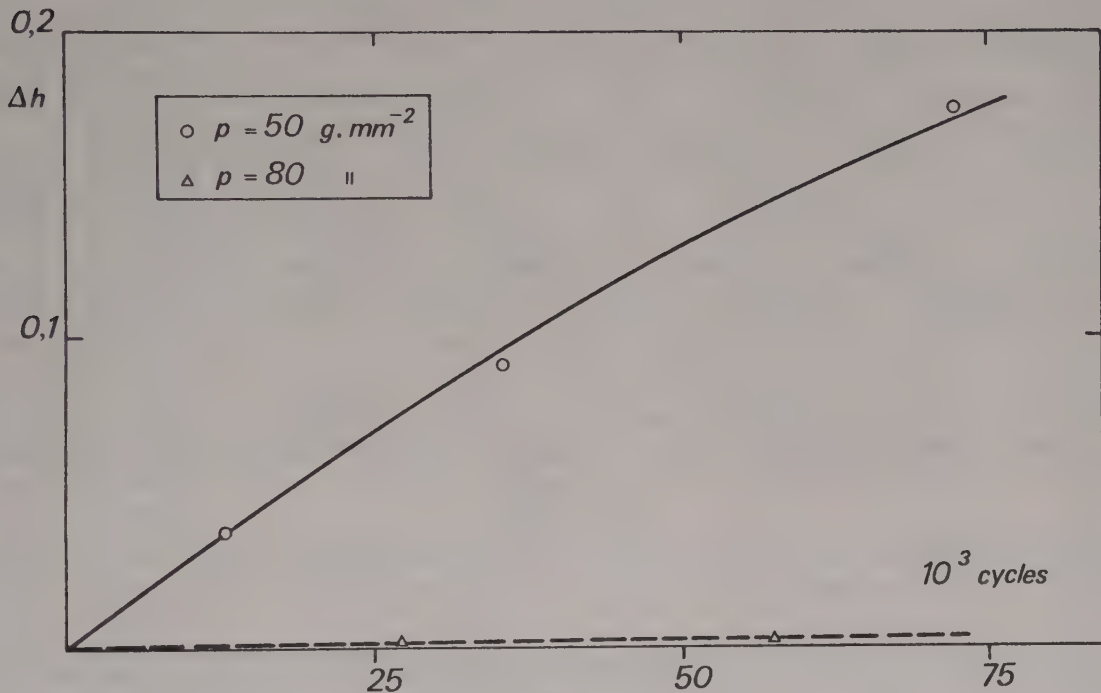


Figure 35 : Couple dentine-résine
Couple émail-résine

Le tableau 27 qui a servi à l'établissement des différentes courbes, mentionne :

- la nature des échantillons testés
- la micro dureté
- la charge appliquée
- la surface du frotteur
- la pression exercée
- le nombre de cycles, ou durée des tests
- et l'usure du frotteur.

M A T E R I A U X				Force (gr/b)	Surface du frot- teur mm ²	Pression gr. mm ²	Durée nbre de cycles	Usure du frotteur mm.
FROTTEUR		PLOT						
Nature	Dureté	Nature	Dureté (HVN)					
Email		Email		300	3,6	85	12 400 27 270 32 400 40 500	0,015 0,04 0,04 0,053
Email	344	Email	350	920	5,25	175	1 500 4 870 9 900	0,04 0,10 0,14
Email	362	Email	323	600	4,8	125	9 600 19 800 50 000	0,020 0,040 0,075
Email	325	Ticon	396	1 400	8	175	31 140 41 940 67 800	0,018 0,024 0,035
Email	364	Ticon	385	400	≈ 4	100	32 400 88 200	0,004 0,01
Email	350	Porcelaine	475	1 400	≈ 8	175	1 800 5 200 12 500	0,04 0,10 0,20
Email	340	Porcelaine	455	400	8,2	48,8	5 400 12 500 35 000 72 500	0,01 0,04 0,10 0,195
Email		Porcelaine		600	6,3	95	2 700 29 070 68 670	0,025 0,22 0,48
Email	371	Or	294	1 500	5,1	300	5 400 26 000 53 000	0,035 0,065 0,10
Email	371	Or	283	600	4	150	6 300 25 000 34 000	0,011 0,027 0,034
Email	309	Résine	64	400	4,9	80	25 200 57 600	€ €
Email		Résine		1 400	7,9	175	12 400 42 000 78 000	€ € 0,005
Email		Chromanit H	339	1 100	6,3	175	7 740 12 870 42 600	0,02 0,03 0,064
Email	290	Chromanit H	339	650	8	81	27 000 44 550 66 150	0,025 0,045 0,06
Dentine	75	Chromanit H	327	1 000	5,7	175	5 200 20 100	0,04 0,104

Tableau 27

M A T E R I A U X				Pression gr/mm ²	Durée nbre de cycles	Usure du frotteur	Usure du plot
FROTTEUR		PLOT					
Nature	Dureté HV.	Nature	Dureté				
Email	344	Email	350	175	12 500	0,15 mm	20 μ m
Email	290	Chromanit H	339	80	12 500	0,040 mm	12 μ m
Email	350	Porcelaine	475	175	12 500	0,200 mm	€
Email	325	Ticon	396	175	25 000	0,015 mm	5 μ m
Email	371	Or	283	150	25 000	0,027 mm	9 μ m
Email	309	Résine	64	80	25 000	€	36 μ m

Tableau 28

4) INCIDENCE DE LA FRICTION SUR LE PLOT FIXE

Dans le tableau 28, nous avons consigné les usures observées sur les différents plots fixes. Ces relevés ont été effectués au bout de 12 500 cycles pour les couples :

- émail/émail
- émail/chromanit H
- émail/céramique

et au bout de 25 000 cycles pour les couples

- émail/ticon
- émail/or
- émail/résine

On constate sur le tableau 28 la faible profondeur de la trace d'usure laissée sur le plot fixe par le frotteur mobile. Les mesures faites au niveau du plot sont données à titre indicatif, car la marge d'erreur de chaque mesure est bien supérieure à la grandeur à mesurer.

On constate en outre, que dans la plupart des couples, l'échantillon fixe a une dureté supérieure à celle de l'échantillon mobile émail, seulement dans les couples émail/or et émail/résine, le spécimen mobile a une dureté supérieure. Dans le couple émail/émail, les duretés sont pratiquement identiques.

Cependant, dans presque tous les cas, on peut noter une usure notable de l'élément mobile et une usure très faible, voir insignifiante de l'élément fixe, pour une durée d'essai de 7 à 14 heures.

Dans le cas du couple émail/céramique, on constate une usure rapide du frotteur émail, alors qu'il n'a pas été possible de noter la profondeur du sillon laissée dans la céramique, tant elle était faible.

Par contre, dans le couple émail/résine, on n'a pu déceler une usure de l'émail, mais on a pu mettre en évidence une usure de la résine.

L'usure plus élevée d'un corps mobile ayant une dureté supérieure à celle du corps fixe, est une donnée expérimentale générale en mécanique; ainsi, l'usure d'un arbre d'acier sera plus élevée que celle du palier de bronze. Cette constatation rejoint la conclusion de MONASKY (cf. p. 47).

5) SYNTHESE

A - Variation de l'usure en fonction de la pression pour un même nombre de cycles

Nous avons regroupé sur la figure 36, l'évolution de l'usure de l'émail face à divers matériaux, en fonction de la pression qui varie de 50 à 300 grs/mm².

La transformation graphique a été effectuée pour un temps d'essai correspondant à 10 000 cycles, soit 20 000 contacts.

L'examen de ces courbes semble mettre en évidence deux types d'usure de l'émail :

1 - Une évolution du type exponentiel, caractérisée par une usure rapide en fonction de la pression appliquée. C'est le cas pour les couples :

- émail/céramique
- émail/émail

2 - Une évolution de type linéaire, caractérisée par une usure relativement lente, et proportionnelle à la pression. C'est le cas pour les couples :

- émail/chromanit H
- émail/or
- émail/ticon

L'ordre des matériaux les plus compatibles avec une faible usure de l'émail antagoniste, s'établit donc ainsi :

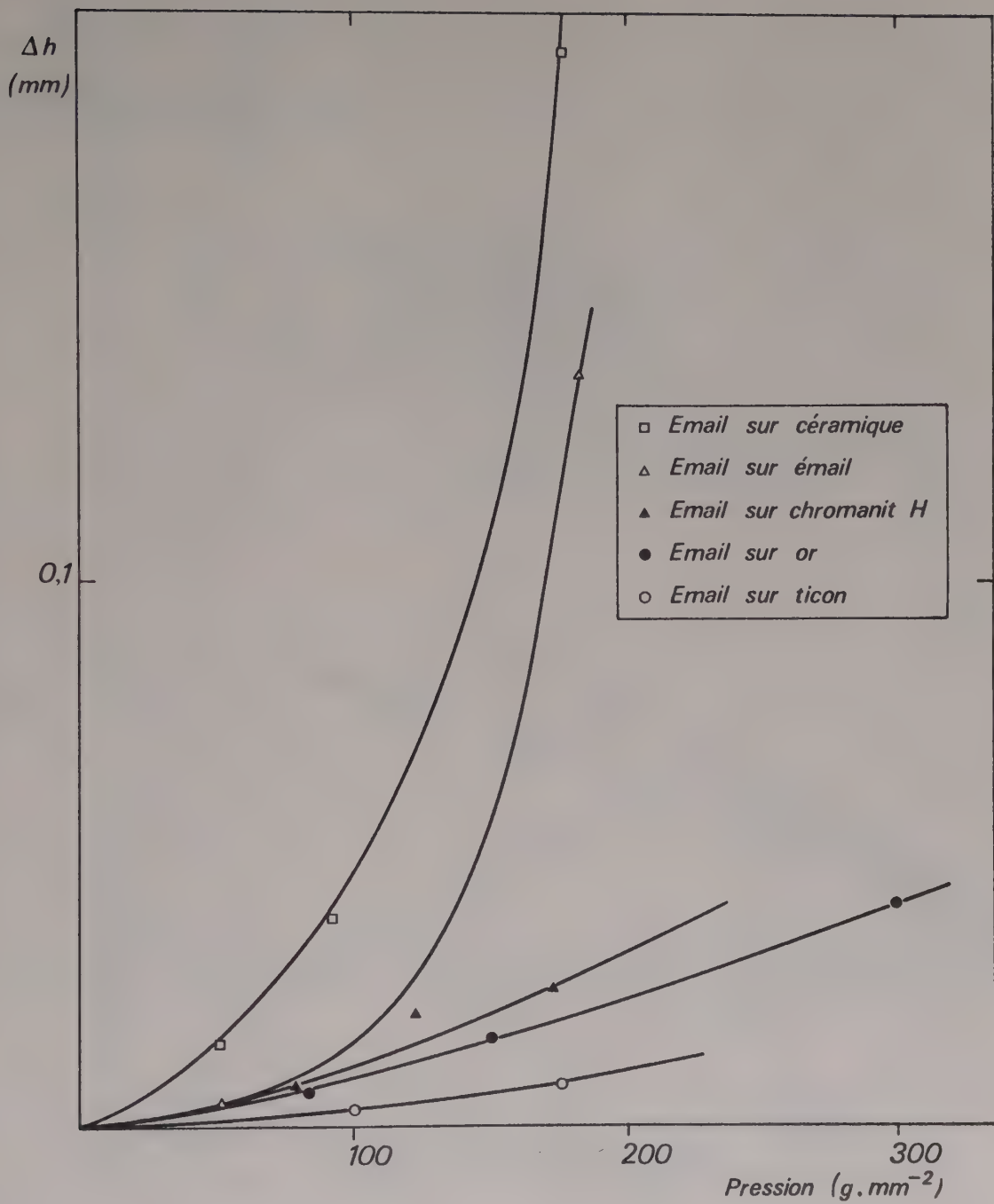


Figure 36 : Evolution de l'usure face à divers matériaux sous pression allant de 50 à 300 grs/mm^2 :

- évolution du type exponentiel {
 - émail/porcelaine
 - émail/émail
- évolution du type linéaire {
 - émail/chromanit H
 - émail/or
 - émail/ticon

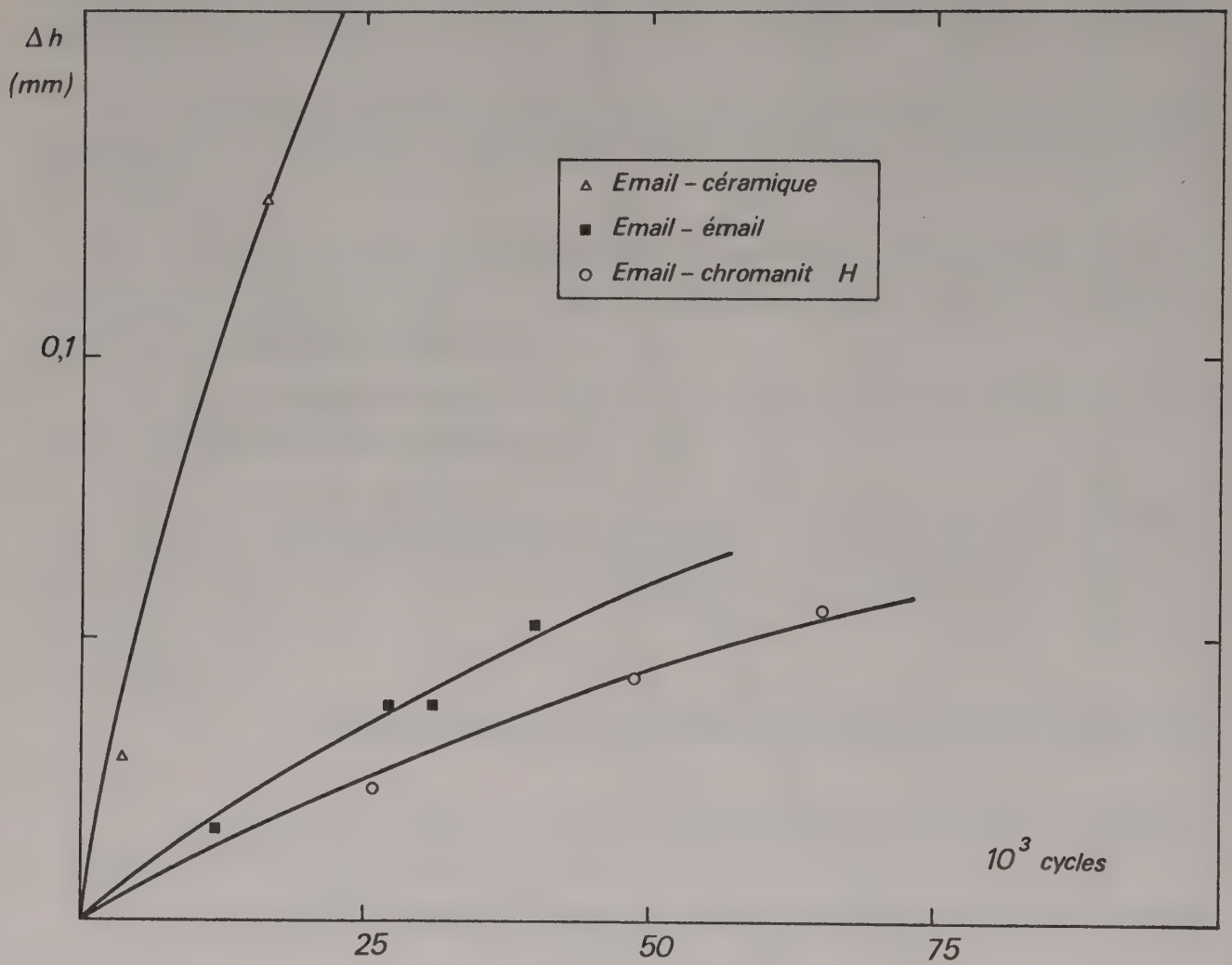


Figure 37 : Usure comparée de l'émail face à divers matériaux sous une pression de 80 grs/mm^2 .

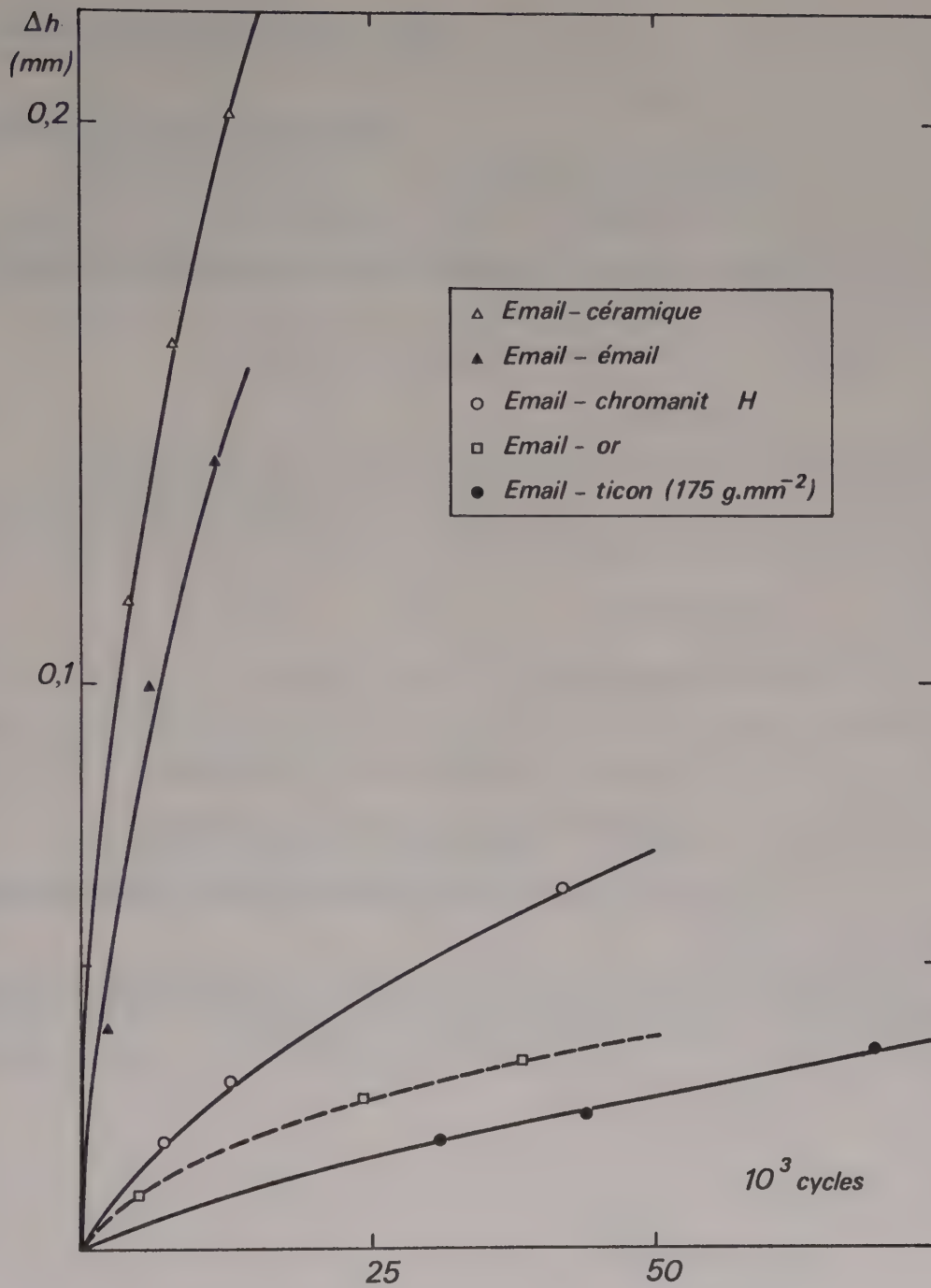


Figure 38 : Usure comparée de l'émail face à divers matériaux sous une pression de 175 g/mm^2 .

ticon
or
chromanit H
émail
céramique

B - Variation de l'usure en fonction du nombre de cycles à des pressions

identiques

La figure 37 met en évidence l'usure de l'émail face à :

- la céramique
- l'émail
- le chromanit H, pour une même pression de 80 grs/mm^2

alors que la figure 38 illustre l'usure de l'émail face à :

- la céramique
- l'émail
- le chromanit H
- l'or
- le ticon, pour une même pression de 175 grs/mm^2 .

Dans les 2 cas, le nombre de cycles va jusqu'à 70 000 et plus.

L'ordre de classement des matériaux, en fonction de l'usure qu'ils occasionnent sur l'émail, demeure identique.

Ce classement, établi en partant des matériaux qui endommagent peu les dents naturelles jusqu'aux matériaux les plus abrasifs, s'établit donc comme suit :

résine
ticon
or
chromanit H
émail
céramique

Du fait de sa faible résistance à l'usure, la résine est à éliminer pour la reconstruction des faces occlusales, et ne doit pas être retenue dans cette classification.

II - INTERPRETATION DES RESULTATS

1) RAPPEL DU PROCESSUS D'USURE

L'usure par frottement, en particulier l'usure par fatigue de surface, est un phénomène complexe. Cette usure par fatigue de surface qui se produit lors de l'attrition de dents antagonistes postiches ou naturelles, nous intéresse davantage dans cette étude, que l'usure provoquée indirectement par des particules abrasives, telle qu'elle se produit au cours de la mastication.

L'attrition proprement dite est la conséquence directe du contact entre deux dents antagonistes, l'une étant fixe (en l'occurrence la canine maxillaire), l'autre étant "mobile" (en l'occurrence la canine mandibulaire).

Deux solides entrant en contact, et étant pressés l'un contre l'autre, soit à l'état statique, soit à l'état dynamique, se déforment. Cette déformation va en croissant lorsque l'effort de contact augmente, ou par l'effet cumulé de la répétition.

Du fait des irrégularités superficielles, la surface de contact microgéométrique réelle est très réduite par rapport à la surface apparente macrogéométrique.

Lors de la mise en contact des surfaces, il se produit un effet de choc qui provoque un écrasement des irrégularités superficielles. Les premiers déplacements se font sur un ensemble de crêtes qui vont être progressivement arasées.

2) EVOLUTION DES SURFACES

Les propriétés mécaniques des matériaux interviennent donc, dès la mise en contact des corps. Au cours du frottement l'aire effective de contact varie, et comme l'a montré HERTZ (CAUBET ⁽¹⁷⁾), cette aire dépend du module de Young et de la limite élastique du matériau. Ceci est vérifié expérimentalement par la mesure de la résistance électrique à l'interface.

La courbe de la figure 39 montre l'évolution de la surface effective de contact, en fonction du module de Young, pour $S = 100 \text{ mm}^2$ et une charge de 20 Kgf.

La figure 40 traduit l'évolution de la surface effective de contact, en fonction de la charge limite élastique par $S = 100 \text{ mm}^2$ et une charge de 20 Kgf.

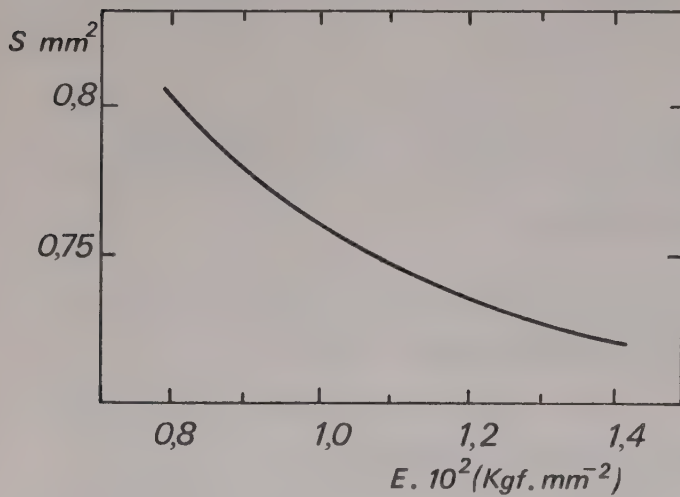


Figure 39

Courbe donnant l'aire S effective de contact, en fonction du module E , pour $S = 100 \text{ mm}^2$ pour une charge de 20 kgf.

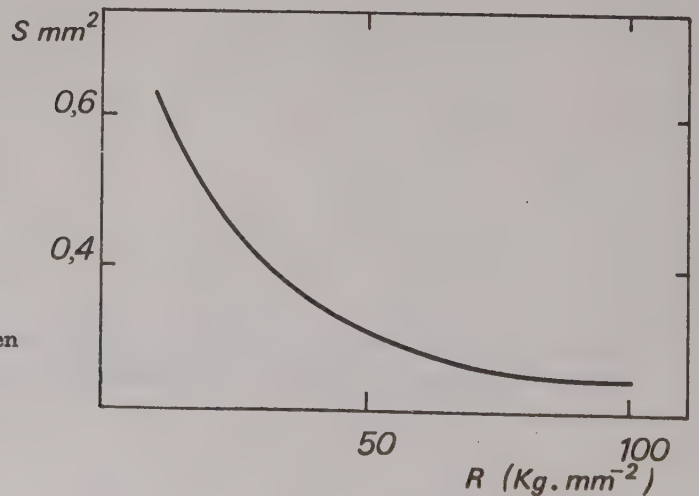


Figure 40

Courbe donnant l'aire S effective de contact, en fonction de la charge limite élastique pour $S = 100 \text{ mm}^2$ pour une charge de 20 kgf.

Sous l'action de frottements intermittents et répétitifs, les aspérités, ainsi déformées sont sujettes à des sollicitations alternées, provoquant une fatigue de surface, pouvant aller jusqu'à la rupture.

Cette usure de surface, ne variera pas de façon uniforme dans le temps : l'usure au début de la mise en service est toujours très forte, puis elle diminue au fur et à mesure de la disparition des aspérités.

La 1ère phase correspond à une période de rodage ou d' "adaptation" au cours de laquelle l'état de surface se modifie de façon à offrir une plus grande surface de portage, diminuant ainsi les pressions locales.

Cette modification est fonction de l'état de surface initial. LEWIS cité par CAZAUD⁽¹⁸⁾ a étudié ce problème, et l'a mis en évidence pour un arbre d'acier sur un palier antifriction. Sur la figure 41 l'usure du corps mobile croît proportionnellement à l'état de surface initial.

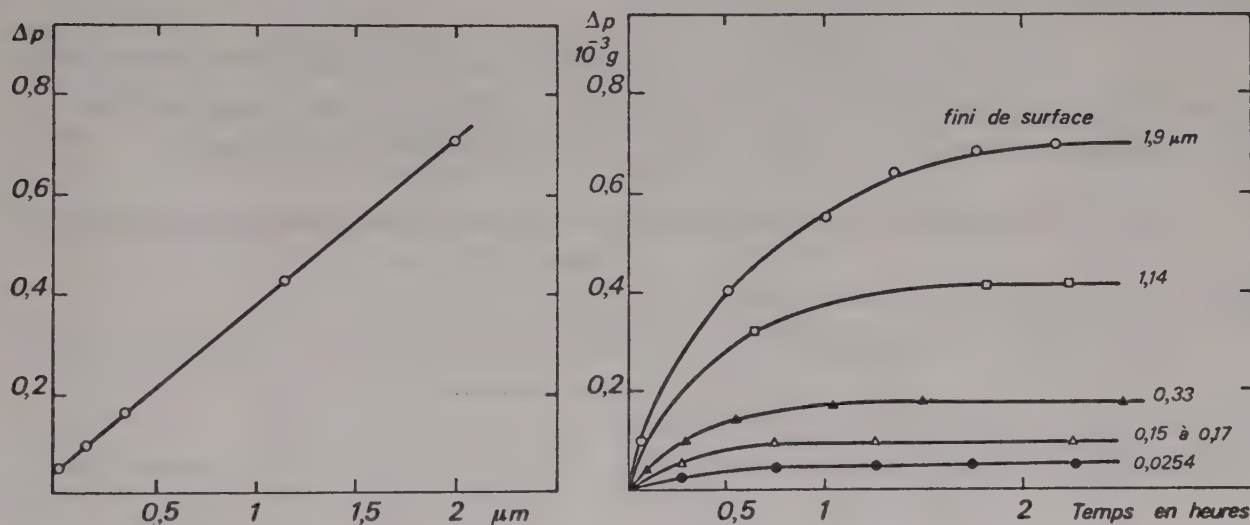


Figure 41 : Usure pendant la période de rodage d'un arbre en acier dans un palier antifriction : charge 3 kg/cm^2 en fonction de la surface initiale et en fonction du temps.

3) CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Dans les chapitres précédents, il a été fait référence aux différentes propriétés mécaniques des matériaux.

Les caractéristiques les plus intéressantes pour décrire le comportement élastique et plastique d'un matériau et qui s'expriment par les mêmes unités, sont :

- la limite élastique (kg/mm^2)
- le module d'élasticité de Young (kg/mm^2)
- la dureté (kg/mm^2)

La combinaison de ces trois grandeurs physiques fondamentales a donné lieu à l'élaboration de 2 critères de synthèse, permettant d'obtenir une classification du comportement à l'usure des divers matériaux :

- le critère d'OBERLE (49)
- le module D.E.R.

a) D'après le critère d'OBERLE

Le critère défini par OBERLE ou Modell Factor est le rapport :

$$\frac{\text{dureté}}{\text{module de Young}} \times 10^6 \quad \text{ou} \quad \frac{H}{E} 10^6$$

La microdureté des différents matériaux a été obtenue au cours des essais expérimentaux sur le microtester de Vickers.

Les valeurs du module de Young ont été fournies par différents auteurs cités au cours des chapitres précédents. La micro dureté et le module de Young s'expriment tous deux en kg/mm^2 , et le rapport des deux, la valeur K, est un nombre sans dimension.

Le tableau 29 donne la valeur de ce nombre K pour différents matériaux.

Matériaux	Critère "K"
Email	$35 < K < 42$
Or	30
Alliages Ni.Cr	23
Céramique	72
Résine	12,5

Tableau 29

D'après ces valeurs, on peut conclure que l'usure de l'email :

- face à la résine, doit être très faible
- face aux alliages or, croît davantage (faible écart)
- face à la céramique, devient importante.

Les résultats expérimentaux ne contredisent pas ce classement, tel qu'il apparaît dans le tableau 30 :

1 Couple	2 Usure après 25 000 cycles (sous 50 grs/mm ²)	3 Usures relatives	4 $K \frac{\text{émail}}{\text{matériaux}}$	5 $\left(\frac{K_e}{K_m} \right)^2$
émail/émail	0,012 mm	1	1	1
émail/résine			0,32	0,1
émail/ticon	0,004 mm	0,3	0,68	0,46
émail/or	0,008 mm	0,66	0,8	0,64
émail/céramique	0,07 mm	5,6	1,95	3,8

Tableau 30

Dans ce tableau, nous avons indiqué dans les colonnes :

- 1 - les différents couples testés
- 2 - l'usure absolue de l'émail
- 3 - l'usure relative des couples, par rapport au couple émail/émail = 1
- 4 - le rapport des critères K d'OBERLE
- 5 - le carré de ce rapport, qui permet d'obtenir un classement plus probant,

et donnant des valeurs relatives plus proches des valeurs fournies par les essais d'usure.

D'après ces données, on peut constater une concordance entre les résultats expérimentaux, et une classification des matériaux selon le critère d'OBERLE (étant implicitement entendu que les états de surface initiaux sont plus ou moins similaires).

b) D'après la D.E.R.

Ce module a été défini précédemment comme le rapport :

$$\frac{\text{limite élastique}}{2 \times E}$$

Il représente la densité d'énergie ressort, ou l'énergie élastique emmagasinée par le matériau.

D'après les valeurs citées par les divers auteurs au cours de cette étude, pour le module Young et la limite élastique, le D.E.R. des différents matériaux sont les suivants :

Matériaux	D. E. R. kg. cm/cm ³
Email	4 à 5,5
Céramique	3,1
Or	4,8
Alliages Ni.Cr	4,7
Résine	5,85
Dentine	4,3 à 9,6

Tableau 31

Ces données montrent que le travail à fournir pour faire apparaître des déformations permanentes, dépend des caractéristiques des matériaux. Ce travail est important pour la résine et décroît pour les autres matériaux dans l'ordre suivant :

- résine
- or
- ticon
- émail
- céramique

Le module D.E.R. est une donnée intéressante pour la période de rōdage ou d'adaptation. Pour deux matériaux d'un couple subissant le frottement, on peut considérer que l'élément ayant le D.E.R. le plus élevé, aura une période d'adaptation plus grande.

La vitesse de rōdage, caractérisée par la perte de matière par unité de temps en début d'essai, varie de façon importante, d'après les résultats expérimentaux.

La période d'adaptation de la résine, du fait de son D.E.R. élevé, est grande, alors que pour la céramique, elle est petite.

La céramique en effet, ayant un D.E.R. relativement élevé, emmagasine peu d'énergie et joue le rôle de "râpe". En outre, un D.E.R. faible amplifie l'effet de choc lors de la mise en contact des échantillons, ce que les cliniciens ont d'ailleurs constaté au sujet de l'effet traumatisant de la céramique sur les dents antagonistes.

Dans le tableau 32, nous avons établi une classification, d'après la valeur relative des modules D.E.R., le couple émail/émail étant pris comme référence-unité.

Matériaux	Rapport des modules D. E. R.	Usure relative expérimentale
Email/émail	1	1
Email/céramique	1,29 à 1,78	5,6
Email/or	0,83 à 1,15	0,66
Email/ticon	0,85 à 1,17	0,3
Email/résine	0,68 à 0,93	
Email/dentine	0,92 à 0,42	

Tableau 32

On peut constater que l'usure de l'émail est d'autant plus grande que la valeur du module D.E.R. du matériau opposé, est faible.

4) CONCLUSIONS

Le critère d' OBERLE ⁽⁴⁹⁾ et le module D.E.R., caractérisant chacun, un des aspects des processus évoqués pour expliquer le phénomène de l'usure permettent d'évaluer l'aptitude des matériaux à subir

des déformations élastiques

et à résister à la formation de déformations permanentes.

Il paraît utile de considérer le critère d'OBERLE et le module D.E.R., simultanément, compte-tenu de l'absence de relation non linéaire entre l'un deux et l'usure. Ils n'ont de réelle signification que si les surfaces auxquelles on les applique, ont une qualité identique.

III - DISCUSSION ET CONCLUSIONS

1) ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODE

Notre ambition au départ de cette étude avait été, compte-tenu des propriétés physico mécaniques, des matériaux antagonistes, du processus de l'attrition consécutive du frottement, d'évaluer l'usure cumulée au niveau de dents opposées.

Nous avons choisi les canines, car à ce niveau, les contacts directs antagonistes sont les plus fréquents et peuvent être isolés par rapport aux dents antérieures ou postérieures. C'est donc au niveau des canines que l'usure est mise, cliniquement, le plus facilement en évidence. Dans les autres cas, par exemple, 2 prémolaires ou 2 molaires antagonistes, la

présence des dents proximales, ne s'usant pas à la même vitesse, joueraient le rôle de rupteur de contact pour le couple testé.

En outre, le rôle particulier joué par les canines, selon la théorie de la protection canine, ou celle de la fonction de groupe, lui donne une importance particulière. L'usure du couple canine/canine, peut entraîner une perte de dimension verticale ayant des conséquences sur le reste de la denture.

Du fait de la grande variété des matériaux dentaires employés en prothèse, des possibilités de combinaisons, multipliées par l'intervention des couples (un échantillon étant fixe, l'autre mobile, ce dernier devenant fixe et le premier devenant mobile), du fait de la durée des tests d'usure, du fait aussi du temps demandé pour les mesures géométriques, micro ou macroscopiques, des relevés de surface, des tests de dureté, il a été impossible d'envisager toutes les combinaisons. Il a fallu procéder à des éliminations, en tenant compte de travaux déjà entrepris par d'autres chercheurs. Au cours de nos tests, nous avons essayé de vérifier leurs résultats et nous nous sommes efforcés d'étudier plus particulièrement certains points, tel que l'usure de l'émail seul, face à divers matériaux, et à introduire dans les couples envisagés, un matériau assez récent, tel que le ticon.

2) CONFRONTATION AVEC LES RECHERCHES ANTERIEURES

Les auteurs cités précédemment ont étudié le problème du frottement de divers couples de matériaux, pour évaluer la conséquence de cette friction, l'un des éléments ou les deux éléments combinés du couple, et pour dresser une hiérarchie des divers matériaux prothétiques.

Tous ont pris en considération l'émail, la porcelaine et l'or, et la résine (sauf MONASKY qui n'a pas retenu ce matériau); certains ont ajouté :

- 1e Cr.Co (NORMAN)
- 1e Ni.Cr (TILLITSON).

Quant à nous, nous avons retenu de même l'émail, l'or, la résine, la porcelaine, le nickel chrome, et avons ajouté le ticon et le chromanit H. Le but de ces chercheurs a été, soit d'évaluer le coefficient de frottement ou résistance à l'usure, tels que NORMAN ⁽⁴⁸⁾, TILLITSON ⁽⁶⁹⁾, CRAIG et PEYTON, soit d'évaluer l'usure par perte de poids, de volume ou par mesure de longueur, pour THOMSON ⁽⁶⁸⁾, MAHALICK ⁽⁴²⁾, MONASKY ⁽⁴⁴⁾.

Nous nous sommes référés aux variations longitudinales. Tous les auteurs reconnaissent l'importance de l'état de surface et donnent quelques indications sur les procédés de polissage; MONASKY a tenu compte essentiellement de l'état de surface de la porcelaine. Nous en avons tenu compte dans tous nos essais, avant et après chaque test.

Les expérimentateurs ont donné la valeur des charges utilisées; nous avons préféré tenir compte de la pression, c'est-à-dire, de la charge par unité de surface. Cette démarche étant le corollaire à l'importance accordée à l'état de surface.

Enfin, l'appareillage que nous avons exécuté, tient compte de principes généraux des auteurs cités, c'est-à-dire :

- contacts intermittents
- contrôle de la force
- contrôle de la vitesse
- lubrification.

Notre frictiomètre se rapproche du montage de MONASKY. Les résultats obtenus par les différents chercheurs permettent d'obtenir une classification individuelle de chaque élément ou une classification du couple de matériaux.

La comparaison des tableaux de cette classification permet de tirer des enseignements de valeur générale :

Classification d'après NORMAN (coefficient de frottement)		Classification d'après TILLITSON, CRAIG et PEYTON (coefficient de frottement)	
Cr.Co/Cr.Co	0,13	Email/Ni.Cr	0,10
Or/or	0,25		
Or/email	0,25	Email/or	0,12
Or/porcelaine	0,31		
Email/email	0,35	Email/email	0,50 à 0,60
Email/porcelaine	0,43	Email/porcelaine	0,50 à 0,90
Porcelaine/acryl	0,45		
Email/acryl	0,45	Email/acryl	0,19
Porcelaine/email	0,48		
Porcelaine/porcelaine	0,80		

Tableau 33

On peut constater que les 2 classifications se réfèrent à de l'email humain pour NORMAN ⁽⁴⁸⁾, à de l'email bovin pour TILLITSON ⁽⁶⁹⁾. Le premier utilise des charges allant jusqu'à 25 grs, le second à des charges de 100 à 1 000 grs. Ceci explique les différences trouvées dans les valeurs du coefficient de frottement.

Cependant les résultats concordent quant à la classification

les couples Cr.Co/Cr.Co, E/Ni.Cr, Or/Or, E/Or
étant pour les 2 auteurs, les meilleures combinaisons

alors que les plus mauvaises sont :

P/E , E/E , P/P , E/P

Classification d'après MAHALICK Perte totale de volume $Cc \times 10^6$	Classification d'après MONASKY P1 = glacée P2 = glacée détruit grain 240 P3 = glacée détruit et polie 400 P4 = P3 reglacée																								
<u>Groupe I</u> Or/or ≠ 0,1 Acryl/or ≠ 0,3 Email/or ≠ 0,4 Porcelaine/or ≠ 0,6	<u>Perte de poids en mg</u> <table><tr><th><u>E</u></th><th></th><th><u>Face à</u></th><th><u>Total</u></th></tr><tr><td>4,77</td><td>P2</td><td>0,73</td><td>5,50</td></tr><tr><td>3,73</td><td>P3</td><td>0,48</td><td>4,21</td></tr><tr><td>2,41</td><td>E</td><td>2,41</td><td>4,82</td></tr><tr><td>2,18</td><td>P4</td><td>0,65</td><td>2,83</td></tr><tr><td>2,38</td><td>Or</td><td>0,41</td><td>2,79</td></tr></table>	<u>E</u>		<u>Face à</u>	<u>Total</u>	4,77	P2	0,73	5,50	3,73	P3	0,48	4,21	2,41	E	2,41	4,82	2,18	P4	0,65	2,83	2,38	Or	0,41	2,79
<u>E</u>		<u>Face à</u>	<u>Total</u>																						
4,77	P2	0,73	5,50																						
3,73	P3	0,48	4,21																						
2,41	E	2,41	4,82																						
2,18	P4	0,65	2,83																						
2,38	Or	0,41	2,79																						
<u>Groupe II</u> Acryl/acryl ≠ 0,8 Email/acryl = 2,4 Porcel/acryl = 2,5	<u>Or</u> <table><tr><td>3,64</td><td>P2</td><td>0,19</td><td>3,83</td></tr><tr><td>2,49</td><td>P1</td><td>0,06</td><td>2,55</td></tr><tr><td>1,56</td><td>P3</td><td>0,65</td><td>2,21</td></tr><tr><td>0,77</td><td>Or</td><td>0,77</td><td>1,54</td></tr></table>	3,64	P2	0,19	3,83	2,49	P1	0,06	2,55	1,56	P3	0,65	2,21	0,77	Or	0,77	1,54								
3,64	P2	0,19	3,83																						
2,49	P1	0,06	2,55																						
1,56	P3	0,65	2,21																						
0,77	Or	0,77	1,54																						
<u>Groupe III</u> Email/Porcel. = 6 Email/émail = 8 Porcel/porcel. = + de 9	<u>P1</u> <table><tr><td>0,48</td><td>P2</td><td>0,64</td><td>1,12</td></tr><tr><td>0,35</td><td>P3</td><td>0,45</td><td>0,80</td></tr><tr><td>0,48</td><td>P1</td><td>0,48</td><td>0,96</td></tr></table>	0,48	P2	0,64	1,12	0,35	P3	0,45	0,80	0,48	P1	0,48	0,96												
0,48	P2	0,64	1,12																						
0,35	P3	0,45	0,80																						
0,48	P1	0,48	0,96																						

Tableau 34

Les résultats de MAHALICK ⁽⁴²⁾ confirment les recherches précédentes, à savoir que les couples du groupe I ayant un des éléments en or, sont les plus favorables et en particulier, le couple or/or.

Les couples du groupe III, c'est-à-dire les combinaisons email/porcelaine sont les plus défavorables. Le couple porcelaine/porcelaine présente, dans l'étude de MAHALICK une perte de volume 100 fois supérieure à celle du couple or/or.

MONASKY fait apparaître dans sa classification le couple or/or (1,54) comme le plus résistant à l'usure.

Paradoxalement, il ressort de sa classification que certains couples de porcelaine soient moins sujets à l'usure. Ce sont les couples :

- P1/P1 0,96
- P1/P2 0,92
- P1/P3 0,80

ce qui semble en contradiction avec les résultats précédents, du moins pour ces couples là.

Pour MONASKY ⁽⁴⁴⁾ les couples les "plus usants" sont :

- Email/P2 Email/P1
- Email/email Email/P3

ce qui concorde avec les autres résultats.

Classification d'après notre étude				
Le critère d'OBERLE			Usure relative	Module D. E. R.
1	- Résine	12,5		
2	- Ni.Cr	23	0,3	0,46
3	- Or	30	0,66	0,64
4	- Email	35 < K < 42	1	1
5	- Porcelaine	72	5,6	3,8

Tableau 35

Dans le tableau 35, la hiérarchie de l'usure relative est parallèle à celle du critère d' OBERLE, dont les valeurs augmentent, et à celle du module D.E.R., dont les valeurs décroissent selon la hiérarchie de matériaux "usants". Cette classification peut se superposer aux classifications précédentes. Elle permet d'en déduire que :

- les "meilleurs" matériaux face à l'émail, sont les alliages :

Ni.Cr	et	Or, type III
-------	----	--------------

- les matériaux les plus défavorables sont :

l'émail et surtout la porcelaine

Par voie de conséquence, les couples les plus favorables, sont les couples :

Ni.Cr / Ni.Cr
Or, type III / Or, type III

et les couples les plus défavorables, sont les couples :

émail / émail
porcelaine / porcelaine

Nous n'avons pas tenu compte de la résine. Si en effet, ce n'est pas un corps usant, c'est par contre un élément qui s'use facilement ainsi qu'on peut le constater dans les résultats expérimentaux de NORMAN ⁽⁴⁸⁾, TILLITSON ⁽⁶⁹⁾, MAHALICK ⁽⁴²⁾, résultats confirmés de longue date par l'expérience clinique de tout praticien.

3) CONCLUSIONS SUR L'ETUDE ET LES RECHERCHES EXPERIMENTALES

Les recherches entreprises par les différents auteurs ont été conduites dans des contextes divers :

- mouvements continus ou apériodiques
- charges comprises entre quelques grammes à quelques centaines de grs/mm²
- lubrification en salive artificielle ou naturelle
- états de surface différents,

font apparaître pour les divers couples de matériaux, des comportements typiques. Nos essais visant en particulier à tester le comportement de l'émail face à divers matériaux, effectués avec de la salive naturelle, confirment ces résultats.

Nous pouvons formuler les conclusions suivantes (voir figure 22 et 23) :

- parmi les matériaux mis en regard de l'émail, la porcelaine entraîne l'usure la plus importante, usure supérieure à celle du couple émail/émail
- le ticon, puis l'or, occasionnent une usure moindre que celle du couple émail/émail
- la résine provoque peu d'usure de l'émail, mais s'use rapidement.

Sur un plan plus général, on peut interpréter ces comportements, en considérant les propriétés mécaniques des matériaux, sans cependant pouvoir établir une relation à caractère mathématique.

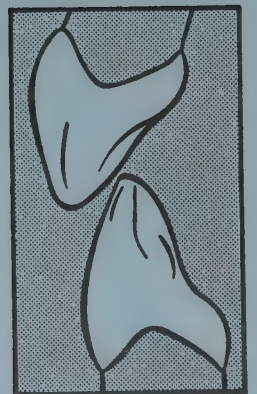
Pour cela, on peut tenir compte de :

- la charge limite élastique
- du module d'élasticité de Young
- la dureté

qui peuvent être intégrés dans le critère d'OBERLE, traduisant la résistance aux déformations permanentes, et au module D.E.R., en aptitude à emmagasiner l'énergie élastique.

Ces données permettent d'explicitier le rôle de l'état de surface initial des 2 éléments d'un couple en frottement, et de mettre en évidence l'existence ou l'absence d'une période de rodage ou d'adaptation.

CONCLUSIONS GENERALES



Le frottement est, dans une certaine mesure, la malédiction d'un système mécanique puisqu'il provoque l'usure, c'est-à-dire, l'enlèvement non souhaité de matière.

La formation de facettes d'attrition est un signal d'alarme : elles laisse présager une usure progressive de la denture, donc une diminution de l'efficacité masticatoire, et un risque de d'apparition de traumatismes paradontaux sur des tissus de soutien faibles.

Les gnathologistes attribuent aux canines, un rôle physiologique fondamental, et un rôle "antifricition" de par leur capacité d'éviter les interférences sur les segments antérieurs et postérieurs.

Dans une occlusion organique, c'est au niveau des canines que peut débiter un processus d'usure par friction. Certains cliniciens envisagent, déjà à ce stade, des restaurations prothétiques pour remodeler ces dents et obtenir des "overbite - overjet" fonctionnels.

Pour préserver aux canines prothétiques leur rôle de protection de l'occlusion, il est essentiel que les matériaux utilisés aient une certaine fiabilité.

Le comportement des matériaux face à l'usure dépend, en grande partie de leur limite élastique, de leur dureté et de leur module de Young, caractéristiques qui sont exprimées synthétiquement par le critère d'OBERLE et le D.E.R.; il dépend aussi de l'état de surface de ces matériaux.

Dans la recherche du matériau idéal qui combinerait les avantages esthétiques de la céramique, la facilité d'emploi de la résine acrylique, de coulabilité et de l'usinabilité de certains alliages, il faudrait donc tenir compte de ces impératifs.

Notre étude expérimentale a mis en évidence, une grande variation de comportements à l'usure des matériaux prothétiques face à l'émail.

La porcelaine apparaît comme le matériau le plus "usant" et la résine acrylique comme le matériau le plus vite usé, par rapport au couple émail/émail. Les gnathologistes n'emploient pas la céramique : ils résolvent le problème esthétique avec la reverse-pin. Cette raison fait que les gnathologistes refusent l'utilisation de la céramique sur les faces triturantes, et recommandent l'emploi d'un seul et même métal sur toutes les faces occlusales.

Par contre les alliages d'or du type III et les alliages nickel-chrome, sont les matériaux qui provoquent le moins d'usure, usure inférieure au couple émail/émail.

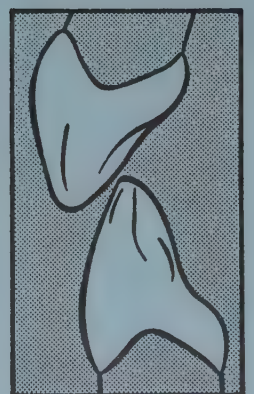
Au point de vue clinique, l'attrition dépend de la charge, c'est-à-dire de la force musculaire; elle dépend plus précisément au niveau des canines, de la pression, donc de la morphologie. Les forces réellement subies par la dent et la fréquence des contacts sont mal connues; elles sont extrêmement variables d'un individu à l'autre.

L'abrasion, quant à elle, est, dans une certaine mesure, une attrition indirecte du fait de l'interposition de particules à l'interface occlusale; l'abrasion a une conséquence sur les couples dents-matériaux prothétiques, dont le résultat est une dislocation du plan d'occlusion, provoquant l'apparition d'interférences.

Les appareillages de laboratoire reproduisent de très loin les conditions cliniques malgré certains impératifs dont on a tenu compte.

Les résultats expérimentaux confirment cependant les constatations cliniques en ce qui concerne le comportement des matériaux prothétiques faces à l'usure.

ANNEXE



CARACTERISTIQUES MECANQUES DES TISSUS DENTAIRES ETUDIES EN COMPRESSION

Dents	Tissus	Module d'élasticité (kg/cm ²) (E)	Limite élastique (kg/cm ²) (P)	Module de D. E. R. (kg-cm/cm ³) (R)	Charge de rupture (kg/cm ²)
Molaire	Dentine	119 500	1 511, 5	9, 6 (9, 56)	3 107, 3
	Email (cuspidé)	471 010	2 265, 0	5, 5 (5, 46)	2 657, 3
Prémolaire	Dentine	140 600	1 490, 4	4, 3 (4, 33)	2 531, 0
	Email				
Canine	Dentine	140 600	1 427, 0	7, 2 (7, 24)	710, 0
	Email (cuspidé)	485 070	1 982, 5	4, 0 (4, 06)	2 938, 5
Incisive	Dentine	133 570	1 265, 4	6, 0 (5, 99)	2 369, 1

D'après STANFORD, WEIGEL, PAFFENBARGER et SWEENEY -
J.A.D.A. Juin 1960

Dents	Section	Distance section du sommet cuspidien (mm)	Email (KHN $\pm$)	Dentine (KHN $\pm$)
2ème M. inf. gauche	parallèle au bord occlusal	2, 02	371 $\pm$ 35	77 $\pm$ 13
		4, 71	390 $\pm$ 30	78 $\pm$ 3
		5, 40		67 $\pm$ 4
		8, 04	368 $\pm$ 32	68 $\pm$ 4
1ère P.M. inf. gauche	idem	0, 51	364 $\pm$ 43	66 $\pm$ 11
		2, 77	292 $\pm$ 28	62 $\pm$ 6
		5, 23	309 $\pm$ 45	71 $\pm$ 5
		5, 92	308 $\pm$ 47	65 $\pm$ 4
1ère P.M. inf. droite	idem	0, 78	344 $\pm$ 49	60 $\pm$ 6
		2, 92	327 $\pm$ 20	72 $\pm$ 5
		4, 98	345 $\pm$ 21	61 $\pm$ 5
		5, 67	335 $\pm$ 25	64 $\pm$ 5

Tests de dureté de CRAIG, PEYTON et JOHNSTON - 1958
(KHN)

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES ALLIAGES D'OR

	Densité g/cm ³	Dureté Vickers	Limite d'élasticité kg/mm ²	Charge de rupture kg/mm ²	Allon- gement %	Point de fusion
<u>PP 2</u>						
En plaque	15,9	96	20	44	15	1 030° C
A couler	15,8	154	41	57	5,5	950° C
Traité	15,8	217	56	72	2,8	950° C
<u>PP 3</u>						
En plaque	17,4	80	31	39	2,9	1 135° C
A couler	15,6	161	53	69	2,3	970° C
Traité	15,6	232	70	89	1	970° C
<u>DG 2</u>						
A couler (Recuit)	15	154	35	52	4,0	920° C
(Traité)	15	247	68	79	1,9	920° C
<u>DG 3</u>						
A couler (Recuit)	15,1	161	52	65	2,7	960° C
(Traité)	15,1	271	93	104	1,3	960° C
<u>DG 5</u>						
A couler	18,5	110/175	35/61	47/49	2,1/1	1 200° C
<u>DURANOR</u>		Dureté Brinell				
A couronnes	11,3	82	18	32	30	1 140° C
A couler	11	163/268	47/82	57/96	21,11	1 020° C
<u>DURANOR SPECIAL</u>						
A couronnes	11,7	86	19	34	32	1 200° C
A couler	11,6	152/254	53/83	62/98	22,11	1 050° C

PP 2 - PP 3 = or pour couronnes et bridges

DG 5 = or pour or porcelaine

DG 2 - DG 3 = or pour plaques amovibles

DURANOR = or blanc de remplacement

* Alliages d'or de la maison Durand-Girard, Lyon

BRUGIRARD (14)

CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'OR D'APRES LEUR COMPOSITION

Type	Or (%)	Argent (%)	Cuivre (%)	Palladium (%)	Platine (%)	Zinc (%)
A	79-92,5	3-12	2- 4,5	0-0,5	0-0,5	0-0,5
B	75-78	12-14,5	7-10	1-4	0-1	0,5
C	62-78	8-26	8-11	2-4	0-3	1
D	60-71,5	4,5-20	11-16	0-5	0-3,5	1-2

Metals Handbook, édition 1948 - Cf. SKINNER et PHILPS (65)

CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'OR D'APRES LEUR DURETE

Type	Groupe de métaux or et platine (minimum %)	B.H.N. (adouci)	
		Min.	Max.
I (Doux)	83	40	75
II (Moyen)	78	70	100
III (Dur)	78	90	140
IV (Très dur)	75	130	...

Metals Handbook, édition 1948 - Cf. SKINNER et PHILPS (65)

** Type	Traitement	Dureté Brinell	Résistance à la traction (100 kg/cm ²)
A	Adouci	45- 70	21-31
B	Adouci	80- 90	32-38
C	Adouci	95-115	34-40
	Durci	115-165	42-57
D	Adouci	130-160	42-52
	Durci	210-235	70-84

** Type	Traitement	Limite élastique (100 kg/cm ²)	Allongement (%)
A	Adouci	6- 10	20-35
B	Adouci	14- 18	20-35
C	Adouci	16- 21	20-25
	Durci	20- 41	6-20
D	Adouci	24- 33	4-25
	Durci	42- 64	1- 6

* Metals Handbook, édition 1948 - SKINNER et PHILPS (65)

** Compositions données dans le tableau

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES PORCELAINES

Méthode de condensation	Retrait de cuisson volumétrique (%)	Densité apparente	Résistance à la rupture (kg/cm ²) (flexion)
Vibration	38,1	2,35	490
Travail à la spatule	38,4	2,34	500
Application au pinceau	40,5	2,36	370
Pas de condensation	41,5	2,36	340

Cf. SKINNER et PHILPS (65)

La résistance de la porcelaine dépend de sa composition et de sa structure interne (ci-dessus : variations selon la condensation)

Température (°C)	Retrait de cuisson en volume (%)	Densité apparente	Résistance à la rupture (kg/cm ²) (flexion)
1 040	16	1,73	130
1 100		2,14	335
1 150	27,7	2,35	560
1 175	35,4	2,37	670
1 200	34,5	2,33	590

(Variations en fonction de la température de cuisson)

Classification	Atmosphère de cuisson	Condition de surface	Résistance à la flexion (kg/cm ²)
Porcelaine	Air	Biscuit	770
		Glacée	1 435
	Vide	Biscuit	810
		Glacée	1 350
Porcelaine alumineuse	Air	Biscuit	1 375
		Glacée	1 400
Alumine fondue			5 300

(Variations en fonction du glaçage : une porcelaine glacée est bien plus résistante qu'une porcelaine non glacée. Une porcelaine alumineuse ne subit pas ces variations)

La résistance de la porcelaine à la traction est faible du fait des défauts de surface. La résistance au cisaillement est basse du fait du manque de ductibilité des matériaux céramiques vitrifiés.

Par contre, la résistance à la compression est élevée : elle est mesurée par un essai de flexion, essai qui intègre les trois contraintes.

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES ALLIAGES COBALT-CHROME ET NICKEL-CHROME

Alliage N°	Chrome %	Cobalt %	Nickel %	Molyb- dène %	Tung- stène %	Manga- nèse %	Sili- cium %	Fer %	Carbone %
A	21,6	43,5	20,1	7,0	—	3,0	0,35	0,25	0,05
B	30,3	59,4	1,5	5,8	0,35	0,34	0,55	0,7	—
C	22,3	29,7	0,7	3,3	—	0,9	1,7	40,0	—
D	26,2	62,6	2,3	5,0	1,2	0,16	0,55	1,0	0,25
E	27,6	51,6	2,3	5,3	—	0,8	—	1,6	—
F	35,0	65,0	—	4,0	—	—	—	—	—
I	26,0	66,0	—	6,1	—	—	0,4	1,6	0,2-0,4
II	24,0	66,0	—	5,1	—	—	0,6	4,0	0,2-0,4
III	27,3	66,7	—	—	5,0	0,4	0,2	0,05	0,2-0,4
IV	26,0	66,0	—	5,6	—	—	1,0	1,6	0,2-0,4
V	26,0	65,0	—	8,0	—	—	0,1	0,8	0,2-0,4
21	27,0	62,6	2,0	6,0	—	0,6	0,6	1,0	0,2
23	23,0	67,4	2,0	—	5,0	0,6	0,6	1,0	0,4
27	23,0	36,4	32,0	6,0	—	0,6	0,6	1,0	0,4
31	23,0	57,6	10,0	—	7,0	0,6	0,6	1,0	0,4

Cf. SKINNER et PHILPS (65)

Alliage	Charge de de rupture (kg/cm ²)	Limite élastique (kg/cm ²)	Module d'élasticité (kg/cm ²)	Allonge- ment %	Densité (g/cm ³)
A	7 600	4 470	1 960 000	3,4	—
B	7 500	4 260	2 060 000	3,2	—
C	7 250	3 460	1 820 000	2,7	—
D	5 900	3 920	1 920 000	6,0	—
E	7 150	4 360	2 000 000	1,9	—
F	7 350	4 200	2 030 000	1,9	—
21	7 100	5 750	2 500 000	8,2	8,3
23	7 360	4 080	2 000 000	7,0	8,5
27	5 770	3 280	1 900 000	7,0	8,2
30	6 860	3 860	2 300 000	5,0	8,3
31	7,060	5 180	1 900 000	11,0	8,6

Cf. SKINNER et PHILPS (65)

CARACTERISTIQUES MECANIKES DES RESINES ACRYLIQUES

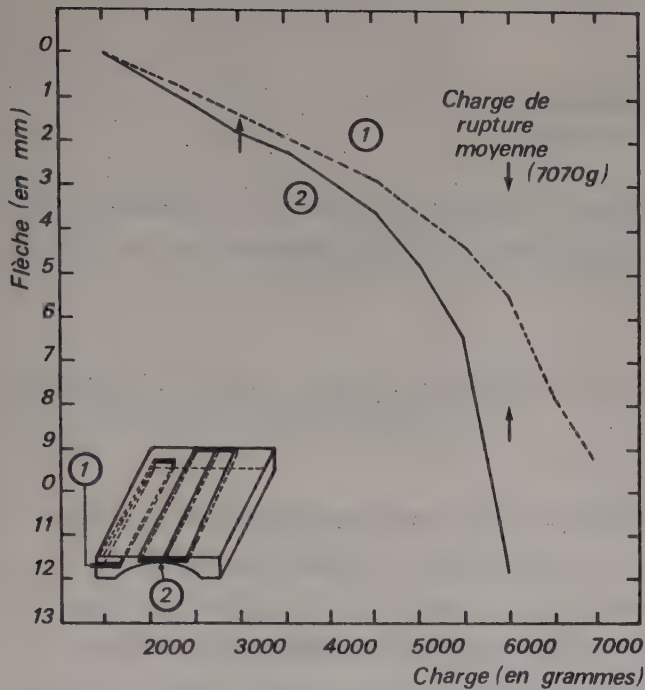
Les polyméthyle-méthocrylates pour résine de base polymérisées à chaud, ont à peu près les caractéristiques suivantes :

- résistance à la traction 600 kg/cm^2
- module E $24\,000 \text{ kg/cm}^2$
- limite élastique 525 kg/cm^2
- dureté Knoop 18 à 20
- résistance à l'impact Charpy
(ou résilience en France) $10 \text{ à } 13 \text{ kg/cm}^2$ (ou 1 à 1.3 Joule/cm²)

Les polyméthyl-méthacrylates ou résine de base polymérisées à froid, ont des propriétés mécaniques abaissées :

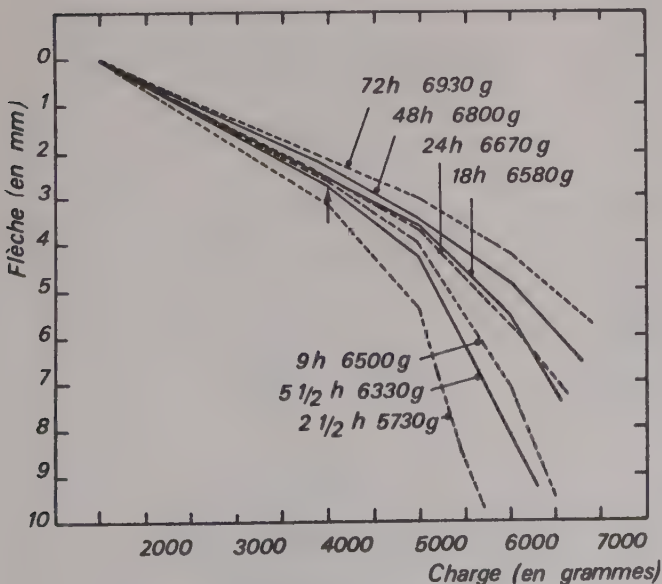
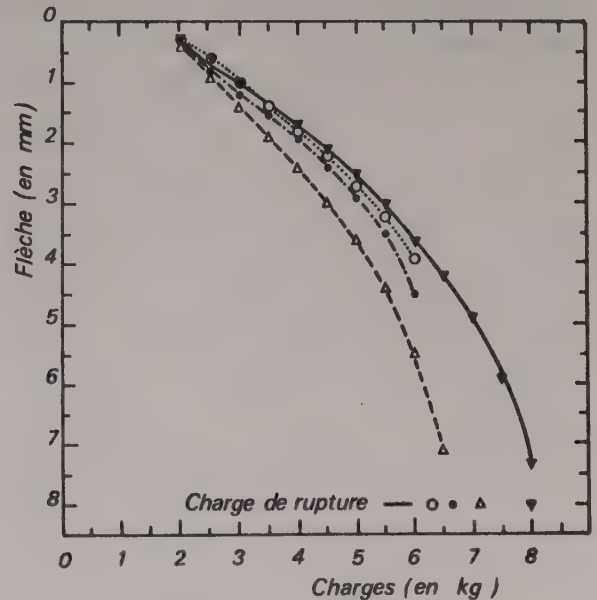
- résistance à l'impact Charpy 8 kg/cm^2 (ou 0,8 Joule/cm²)
- dureté Knoop 16 à 18

Les variations des propriétés dépendent de la composition de la résine, de la technique de fabrication, de l'environnement de la prothèse.



Résistance à la flexion du poly (méthyl méthacrylate) en fonction de l'épaisseur de la résine cuite. Les échantillons (courbe 1) préparés à partir des parties les plus épaisses du bloc polymérisé (coin inférieur gauche) sont plus solides et plus rigides que les échantillons préparés à partir des parties les plus minces (courbe 2). (D'après HARMAN - J.A.D.A., Février 1949).

Courbe contrainte-déformation à la flexion d'une résine acrylique pour usage prothétique typique montrant l'influence des différents conditionnements d'échantillons, et des conditions d'essai. Tous les échantillons ont été conditionnés pendant trois jours avant l'essai. (D'après SWANEY, PEFFENBARGER et CAUL - J.A.D.A., Janvier 1953).



Courbes contrainte-déformation à la flexion pour des échantillons de poly (méthyl méthacrylate) cuits pendant différentes durées à 71°C. Le temps de cuisson et la charge sont portés sur chaque courbe. (D'après HARMAN J.A.D.A., Février 1949).

ALLIAGES NICKEL-CHROME EN PROTHESE CONJOINTE

Les alliages précédents, à base de chrome, contenant ou non du fer, du cobalt ou du nickel, sont connus depuis 1913 sous le terme de super-alliages. Il sont utilisés depuis 1933 en prothèse adjointe.

Depuis 1970, on les utilise de plus en plus en prothèse conjointe du fait de l'amélioration des coulées.

Les alliages Ni.Cr. ont des caractéristiques mécaniques supérieures aux alliages précieux (type dégudent, entre autre) utilisés dans la fabrication des céramo-métalliques. Le module E, la dureté, les résistances à la compression, à la traction et à la flexion sont augmentées. Ceci permet d'augmenter la résistance de la porcelaine à la fracture, de réaliser des bridges de longue portée, de diminuer l'épaisseur du métal, ou de limiter la perte de substance dentaire.

COMPOSITION MOYENNE DE LA SALIVE MIXTE HUMAINE

I - PROPRIETES PHYSIQUES

Volume	500 à 1 600 cc par 24 heures
Densité	1,004
pH.....	7,07
Réserve alcaline.....	40 à 60 volumes
Pouvoir oxydo-réducteur.....	20,8 à 24,5 millivolts
Tension superficielle.....	55 dynes
Conductibilité électrique.....	330 à 340 x 10 ⁻⁴ mhos/cm
Charge électrique	négative
Viscosité	1,10 à 1,32 poise
Point de congélation	- 0°,2 à - 0°,4

II - COMPOSITION CHIMIQUE

Eau.....	99,4 %
Extrait sec.....	0,60 %
Cendres	0,20 %
Matières organiques.....	0,20 %

A - Constituants minéraux

a) Cations

Calcium :	5,8 mg %
Magnésium :	0,7 mg %
Sodium :	20 mg %
Potassium :	70 mg %
Fer :	0,05 mg %

b) Anions

Chlorures :	70
Fluorures :	0,01

Phosphates : 4 à 22

10,5 à 29,3 mg % (phosphore acido-soluble)

2,5 à 49,2 mg % (phosphore inorganique)

Nitrates : traces

Sulfates : 2 à 5 mg %

Carbonates en relation avec CO_2

B - Gaz

Gaz carbonique : 40 à 60 volumes

Oxygène : 0,84 à 1,46 cc

Azote : 2,37 à 3,77 cc %

C - Constituants organiques

a) Sulfocyanures : 6 à 9 mg %

Urée : 7 à 15 mg %

Acide urique : 0,35 à 0,5 mg %

b) Protides

1) Acides aminés 0,23 à 0,48 mg %

Tryptophane	3,3	à	8,6	mg %	Tyrosine.....	0,6	à	1,5	mg %
Arginine.....	1,0	à	1,6	mg %	Proline.....	0,05	à	0,2	mg %
Valine.....	4,0	à	8,0	mg %	Leucine.....	1,5	à	1,8	mg %
Ac. glutamique	0,6	à	1,75	mg %	Serine.....	0,2	à	0,6	mg %
Phenylalamine.....	0,6	à	5,6	mg %	Isoleucine.....	0,2	à	0,4	mg %
Thréonine.....	0,25	à	1,5	mg %	Cystine.....	0,4	à	1,3	mg %
Lysine.....	1,9	à	10,0	mg %	Histidine.....	0,05			mg %
Glycine.....	0,2	à	0,3	mg %	Méthionine				

2) Mucine : 200 mg %

3) Albumine vraie : 10 à 50 mg %

c) Glucides

Glucome : 10 à 30 mg %

Acide lactique : 8 à 13 mg %

d) Lipides

Cholestérol : 7 mg %

Lipides phosphorés : 0,12 mg %

e) Vitamines

C : 14 à 90 mg %

PP : présence

f) Hormones

Callicréine : 2,4 KE par cc

Histamine : 4/10 de mg par litre

g) Enzymes

Amylase : activité de 60 à 80 grammes d'amidon hydrolysé par
100 cc de salive en 1 heure

Phosphatase :

Acide : 4,3 mg % de P libéré par 100 cc de salive en 3 heures

Alcaline : 2,4 mg % de P libéré par 100 cc de salive en 3 heures

Lipase : présence

Protéinase : présence

Oxydase : présence

Peroxydase : présence

Catalase : présence

Anhydrase : présence

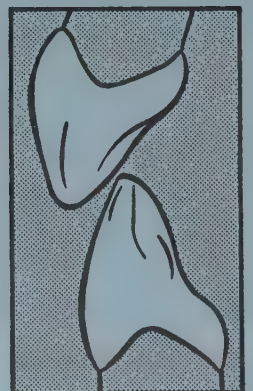
Principes antibactériens : présence

Lysozymes : présence

Inhibines : présence

Aux hormones (f), OGATA et ITO ajoutent la "parotine".

BIBLIOGRAPHIE



- 1) ACKERMANN F. Le mécanisme des mâchoires, Ed. Masson, 1953.
- 2) ALEXANDER P.- The peridontium and the canine function theory, J.P.D., Vol. 18, No 6, 571-578, Dec. 1967.
 - Analysis of the cuspid protection occlusion, J.P.D., Vol. 13, 307-317, Dec. 1963.
- 3) d'AMICO A.- A study of the comparative functional mammalian masticatory systems : Gnathodynamics and function of their natural dentition, Part. II, South. Calif. St. Den. Ass. Jour., Vol. 33, No 11, Nov. 1965; Part. III, id. No 12, Nov. 1965.
 - The canine teeth : Normal functional relation of the natural teeth of man. South. Calif., St. Den. Ass. Jour., Vol. 26, No 1-7, 1958.
 - Application of the concept of the functional relation of the canine teeth. South. Calif., St. Den. Ass. Jour., Vol. 27, No 2, Feb. 1959.
 - New concept of functional occlusion of the natural teeth in restorative dentistry. J. of Texas D.A., Vol. 80, No 1, Ja. 1962.
 - Functional occlusion of the natural teeth of man. J.P.D., Vol. 11, No 5, 899-915, Sept. 1961.
- 4) ARCHARD J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. Y. Applied Physics, p. 981, Août 1953 (cité par l'HERMITE).
- 5) BAER et al. Alveolar bone loss and occlusal wear. Jour. of the Amer. Soc. of Period., Vol. 1, No 3, 1-98, Ma-Ju. 1963.
- 6) BARON R., LEJEUNE M. Aspects microscopiques des surfaces d'usure et mouvements mandibulaires. Etude préliminaire sur quelques mammifères. Sc. et Recherche Odo-Sto, Vol. 2, No 6, Jui-Jui 1972.
- 7) BEGG P.R. Stone age man's dentition. Amer. Jour. Ortho., Vol 40, No 4, Ap. 1954.
- 8) BEYRON H.L. Occlusal changes in adult dentition. J.A.D.A., No 48, 674-686, 1954.

- 9) BLACK G.V. Descriptive anatomy of the human teeth. Philadelphia SS White Dent. Mfg 1902
- 10) BONIN P. Modifications de l'appareil manducateur, chez les sujets privés de viande. Mesures des forces masticatoires. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, UER Lyon 1972.
- 11) BOWDEN F.P. et TABOR D. Friction et lubrification, Ed. Dunod, Paris 1959.
- 12) BROCA P. Instructions relatives à l'étude anthropologique du système dentaire. Bull. Soc. Anthr., p. 149, Paris 1897.
- 13) BRODIE A.G. The three arcs of mandibular movement as they affect the wear of teeth. Angle Ortho., Vol. 39, No 4, 217-229, Oct. 1969.
- 14) BRUGIRARD J. Etude du comportement électro-chimique des métaux et alliages dentaires, Ed. Prélat, 1970.
- 15) BUNISSET P. Les alliages Ni-Cr en prothèse fixe. Inf. Den. Vol. 10, No 41, p. 10, 1974.
- 16) BURWELL J. Surveys of possible wear mechanisms. Wear Vol. 1, No 2, 119-141, Oct. 1957.
BURWELL J. and STRANG C.D. Metallic wear Pro. Roy. Soc. Vol. 212, p. 470, 1952 (cité par COURTEL)
- 17) CAUBET J.J. Théorie et pratique industrielles du frottement. Ed. Dunod, Paris, 1964.
- 18) CAZAUD R. Le frottement et l'usure des métaux, les antifrictions, Ed. Dunod, Paris, 1955.
- 19) CIVJAN S. et al. Effects of heat treatment on mechanical properties of 2 Ni-Cr based alloys. J.D.Res., 1537-1544, Dec. 1972.
- 20) COURTEL R. Frottement. Lubrification. Usure. Connaissance de base.
- 21) DAHLBERG A.A. and KINZEY W. Etude microscopique de l'abrasion et de l'attrition à la surface des dents. Bull. Group. Inter. Rech. Sto., Vol. 5, 242-251, 1962.
- 22) DONOVAN R.W. A cephalometric and temporomandibular joint radiographic study. Ph. D. Th. Northwest. Univ. Den. Sch. Chicago, 1953 (cité par HODGE).
- 23) DRUM W. Parafunctions et processus d'autodestruction. Ed. Prélat, 1971.
- 24) GOTTLIEB B. Continuous deposition of cementum. J.A.D.A., Vol. 30, p. 842, 1943.
- 25) GRIMBERT L. Répliques de la surface de l'émail examinée au microscope à contraste interférentiel. J. Biol. Bucc., Vol. 2, 23-38, 1974.
- 26) HARTER J.C. Module d'élasticité des céramo-alumines. Rev. d'Odonto-Sto. Vol. XX, No 3, 1973.

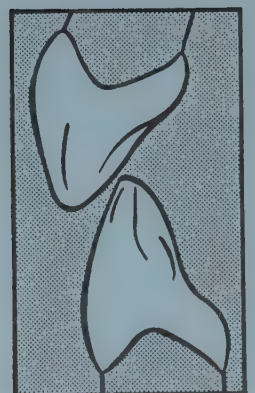
- 27) HODGE L.C. and MAHAN P.E. A study of mandibular movement from centric occlusion to maximum intercuspitation. J.P.D., Vol. 18, No 1, 19-30, Jul. 1967.
- 28) HOLM R. Electric contacts. Uppsala 1946 (cité par COURTEL).
- 29) L'HERMITE R. Méthodes générales d'essai et de contrôle en laboratoire. Ed. Eyrolles, Paris 1959.
- 30) INGERVALL B. Retruded contact position of mandibule. Odont. Rev., Vol. 15, 130-149, 1964 (cité par HODGE).
- 31) IZARD G. Orthodontie. Chompret. Ed. Masson, 1950.
- 32) JACOBSON A. Attition of teeth in the South African Bantu. Am. Jour. Ortho., Vol. 62, No 1, Jul. 1962.
- 33) JANKELSON B., HOFFMAN G.M. and HENDRON J.A. The physiology of the stomatognathic system. J.A.D.A., Vol. 46, p. 375, 1953.
- 34) KLEINBERG M. Rôle de la dureté des matériaux prothétiques participant au système stomatognathique. Thèse de Doct., UER Lyon, 1973.
- 35) KERRIDGE M. and LANCASTER J.K. The stages in a process of severe metallic wear. Proc. Roy. Soc., Vol. 236, 250-263, 1959 (cité par COURTEL).
- 36) KRAGELSKY I.V. Friction and wear (traduit du russe). London, Butterworth 1965, (cité par COURTEL).
- 37) KYDD W.L. and SANDER. A study of posterior mandibular movements from intercuspatal position. J.D. Res., Vol. 40, 419-425, 1961.
- 38) LACOUR M. Les inclinaisons mésio-distales des canines permanentes et des prémolaires supérieures. Recherche d'un plan de référence. Rev. de Stom., Vol. 71, No 1, 5-12, 1970.
- 39) LAURITZEN A.X. Procedure manual. West Coast Printing Co, 1969.
- 40) LUNDEEN H.C. An introduction to occlusal anatomy, Copyright, 1969.
- 41) Mac LEAN J.W. and HUGUES T.N. High alumina ceramics for bridge pontic construction. Brit. D.J., Vol. 123, No 12, 571-577, 1967.
- 42) MAHALICK J.A, KNAP F.J. and WETTER E.J. Occlusal wear in prosthodontics. J.A.D.A., Vol. 82, No 1, 154-159, 1971.
- 43) MARC ELIN A. Le frottement et l'usure en frottement direct dans l'huile, en relation avec l'état de surface. Inst. Fr. du Pétrole., Réf. 2 943, Vol. XIII, 9-9, 1958.
- 44) MONASKY G.E. and TAYLOR D.F. Studies of the wear porcelain, enamel and gold. J.P.D., Vol. 25, No 3, 299-306, Mar. 1971.
- 45) MOLNAR S. Human tooth wear, tooth function and cultural variability. Am. J. Anthropol., Vol. 34, 175-190, Mar. 1971.

- 46) MOORREES C.F. The Aleut dentition correlative study of dental characteristics in an Eskimoid people. Cambridge, Mass 1957, Harvard Univ. Press.
- 47) MURPHY T. Compensatory mechanisms in facial height adjustment to functional tooth attrition. The Begg J. Ortho. : Theory and treatment, Vol. 2, No 1, 9-20, Apr. 1963.
MURPHY T.R. The progressive reduction of tooth cusps as it occurs in natural attrition. Den. Pract., Vol. 119, No 1, 8-14, Sept. 1968.
- 48) NORMAN R.L. Frictional resistance and dental prosthetics. J.P.D., Vol. 14, No 1, 45-51, Ja-Feb. 1964.
- 49) OBERLE T.L. Propriétés agissant sur l'usure des métaux. J. of Metals, No 6, p. 438, Jun. 1951.
- 50) ORBAN, BALINT. Orban's periodontics, 2d. Ed. St. Louis Mosby C^O, 1963 (cité par d'AMICO).
- 51) PANKEY L.D. and MANN B.S. Oral rehabilitation. Part II, Reconstruction of the upper teeth using a functionally generated path technique. J.D.P., Vol. 10, No 1, 151-162, Ja. 1960.
- 52) PAYNE E. Functional Waxing Technic. Procedures for occlusal treatment. Copyright Denar C^O 1969.
- 53) POGGIOLI J. Module d'élasticité et résistance à la flexion des porcelaines céramo-métalliques opaques. R.F.O.S., 754-766, Ju-Juil. 1970.
- 54) POSSELT U. Physiologie de l'occlusion et réhabilitation. Ed. Prélat, 1968.
POSSELT U. Studies in the mobility of the human mandibule. Act. Odont. Scand. 1952 (cité par HODGE).
- 55) PREISKEL H. The canine teeth related to Bennett movement. British D.J., Vol. 13, No 7, Oct. 1971.
- 56) PRUZANSKI S. Tape recorded lecture. Tufts Univ. Berhsire, Conf. Jun. 1972 (cité par d'AMICO).
- 57) REYNOLDS J.M.- Abutment selection for fixed prosthodontics. J.P.D. 483-488, May 1968.

- The organisation of occlusion for natural teeth. J.P.D. Vol. 28, No 1, 56-67, Juil. 1973.
- 58) RIVault N. La coiffe à incrustation vestibulaire. Ed. Prélat, Paris 1971.
- 59) SAADOUN A P. L'occlusion : données actuelles. Rev. Odont. Sto., Vol. XIX, No 5, 1972.
- 60) SCHUYLER C.H. The function and importance of incisal guidance in oral rehabilitation. J.D.P., Vol. 13, No 6, 1 011-1 029, 1963.

- 61) SCOTT M.E. and BAUM L. Procedure and technics for restoring "Canine Function" for abraded teeth. South. Calif. St. D. Ass. J., Vol. 32, No 1, 23-28, Ja. 1964.
- 62) SHAW D.M. Form and function in teeth. Int. J. Ortho., Vol. 10, 703-718, 1924, (cité par STUART).
- 63) SHEPPARD I.M. and MARKUS N. Total time of tooth contacts during mastication. J.P.D., Vol. 12, No 3, 460-463, 1962.
- 64) SICHER H. The biology of attrition. Oral Surg., Vol. 6, 406-412, 1953.
- 65) SKINNER E.W. et PHILIPS R.W. Science des matériaux dentaires, Ed. Prélât, 1971.
- 66) STUART C.E. Good occlusion for natural teeth. J.P.D., Vol. 14, 1964.
- 67) THOMAS P.K. L'occlusion organique : dent à dent, cuspide-fosse. Ed. Prélât, 1973.
- 68) THOMSON J.C. Attrition of acrylic teeth. Den. Pract., Vol. 15, No 7, 233-236, 1965.
- 69) TILITSON E.W., CRAIG R.G. and PEYTON F.A. Friction and wear of restorative materials. J.D. Res., Vol. 50, No 1, 149-154, Ja-Feb. 1971.
- 70) TYLMAN S.D. Theory and pratice of crown and bridge prosthodontics. The Mosby C^o, 1965.
- 71) WEINBERG L.A. Diagnosisof facets in occlusal equilibration. J.A.D.A., Vol. 52, 26-35, 1956.
- 72) YURKSTAS A.A. The masticatory act. J.D.P. Vol. 15, No 2, 248-260, Ma-Ap. 1965.

TABLE DES MATIERES



<u>INTRODUCTION</u>	1
 <u>Chapitre I</u> - <u>USURE ET BIOPHYSIOLOGIE</u>	
I - Essai de classification	5
II - Point de vue des anthropologues et des ethnologues	5
III - Gnathologie et rôle de la canine	7
IV - Les facettes d'attrition	9
V - L'émail usé	9
VI - Les conditions chimiques du frottement au niveau canines	10
1) Agénésie	10
2) Anthropométrie	10
3) Morphologie et rapports des canines	11
4) Occlusion et friction	11
5) Aire de frottement	13
VII- Conclusions	15
 <u>Chapitre II</u> - <u>USURE ET PROPRIETES DES MATERIAUX</u>	
I - Caractéristiques mécaniques	17
1) La dureté	17
2) Analyse critique de la dureté	18
3) Caractéristiques des contraintes-déformations à l'état dynamique	19
4) Le critère d'Oberlé	20
II - L'usure	20
1) Définition	20
2) Les paramètres	21
3) Les procédés de mesure	21
4) Essai de classification	21
5) Mécanisme de l'usure	22
6) Les étapes de l'usure	24
III - Le frottement	25
1) Définition	25
2) Le coefficient de frottement	25
3) L'interface	26
4) Structures géométriques des surfaces	28
5) Les lois de frottement	30

6) Mécanique de surface	30
7) Mécanisme de frottement	31
8) Conséquence du frottement : usure et endommagement des surfaces	33
IV - Conclusion	34

Chapitre III - LES ETUDES EXPERIMENTALES ANTERIEURES

I - Principes généraux d'expérimentation	39
1) Forme macroscopique des échantillons	39
2) Etat de surface des matériaux testés	40
3,4) Nature de la matière se trouvant à l'interface : humidité température liquide, abrasif	42
5) Charges exercées sur le corps	42
6) Nature et vitesse du mouvement relatif ; production et durée du mouvement	43
II - Appareillages	45
1) Pour la détermination du coefficient de frottement	45
2) Pour la détermination de l'usure par frottement	46
III - Méthodes d'évaluation de l'usure	46
1) THOMSON : mesures de longueur	46
2) MAHALICK : pesées, profilométrie, largeur de la trace d'usure, taux moyen de la perte totale de poids, moyenne de la perte totale de volume	46
3) MONASKY : pesées, états de surface	47
IV - Résultats	48
1) Le coefficient de frottement	48
2) Le taux d'usure	53

Chapitre IV - LES ETUDES EXPERIMENTALES PERSONNELLES

A - MATERIEL ET METHODE	
I - Les matériaux sélectionnés	61
1) Les alliages	62
2) Les cosmétiques	64
II - Méthode expérimentale	66
1) Préparation des échantillons	66
2) Les relevés de l'état de surface : le Talysurf	70
3) La micro-dureté, le microduremètre Vickers	74
4) La lubrification	74
III - L'appareillage : le friccionmètre	76
1) Le dispositif d'entraînement	78
2) Le dispositif de mise en contact intermittent	78
3) Le dispositif de mise en charge	78
4) Analyse critique du dispositif expérimental	82
IV - Mesures et contrôles	82

B - LES RESULTATS

I - Les variations du comportement des matériaux testés	85
1) Les variations des états de surface	85
2) Les variations de la microdureté	93
3) Les variations géométriques ou évaluation de l'usure de l'émail	95
4) Incidences de la friction sur le plot fixe	103
5) Synthèse	104
II - Interprétation des résultats	109
1) Rappel du processus d'usure	109
2) Evaluation des surfaces	110
3) Classification des matériaux	111
III - Discussion et conclusions	115
1) Analyse critique de la méthode	115
2) Confrontation avec les recherches antérieures	116
3) Conclusions sur l'étude et les recherches expérimentales	120

<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	123
------------------------------------	-----

<u>ANNEXE</u>	125
---------------------	-----

<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	137
----------------------------	-----

<u>TABLE DES MATIERES</u>	143
---------------------------------	-----

